



Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій  
(повна назва)  
Кафедра Інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського  
(повна назва)  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(код і повна назва)  
Тип програми освітньо-наукова  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)  
Освітня програма Дослідження засобів реалізації передачі голосу в мережі LTE  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_

**ЗАВДАННЯ  
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ**

студенту Комарову Олексію Владиславовичу  
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи: Дослідження засобів реалізації передачі голосу в мережі LTE  
Затверджена наказом по університету від «11» березня 2020р. №437Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 25.05.2020р.
3. Вихідні дані до роботи: Пошук рішення для реалізації голосових послуг в мережі LTE. Зробити експериментальні дослідження шляхом розгляду недоліків обраної технології, що впливають на продуктивність та зробити необхідні розрахунки.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
  - 1) Огляд технологій передачі голосу в мережі LTE.
  - 2) Аналіз і докладне вивчення способів обраних технологій.
  - 3) Експериментальне дослідження недоліків обраної технології.
  - 4) Вивчення результатів дослідження та аналіз можливості впровадження технології в мережу LTE.
  - 5) Оцінка показників якості обслуговування заявок в мережах LTE.

6. Консультанти розділів роботи

Найменування Розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
1,2,3,4,5	професор Коляденко Ю.Ю.		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 01.02.2020 \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Визначення та затвердження теми кваліфікаційної роботи	01.02.2020	виконано
2	Формулювання завдання на її виконання	12.03.2020	виконано
3	Розробка теми роботи згідно із завданням	21.04.2020	виконано
4	Оформлення роботи та підготовка до захисту	09.05.2020	виконано

Студент \_\_\_\_\_ Комаров О.В  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ проф. Коляденко Ю.Ю  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 72 с., 17 рис., 8 табл., 24 джерел

ТЕХНОЛОГІЯ LTE, СЕАНС ПЕРЕДАЧІ ГОЛОСУ, ОПЕРАТОРИ, МАРШРУТИЗАЦІЯ, БАЗОВА СТАНЦІЯ, ЧАС З'ЄДНАННЯ, ЗАВАНТАЖЕНІСТЬ КАНАЛУ.

Об'єкт дослідження – технології передачі голосу в мережах LTE.

У роботі розглянуті особливості архітектури мереж четвертого покоління мобільного зв'язку LTE, взаємопов'язана структура транспортних і логічних каналів. Виконано загальний огляд технологій передачі голосу в мережах LTE. Проведено аналіз і докладне вивчення найбільш підходящих методів.

Також в роботі приведені результати експериментального дослідження обраної технології на основі мережі LTE компанії «Київстар». Представлені розрахунки технологічних характеристик радіоінтерфейсу стандарту LTE. Пропонується оптимальний варіант вирішення проблеми організації голосових послуг в мережі LTE і обґрунтовується доцільність впровадження обраної технології.

Проведено розрахунок технологічних характеристик мережі LTE та розрахована та досліджена оцінка показників якості обслуговування заявок в мережі LTE

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка: 72 с., 17 рис., 8 табл., 24 источников

ТЕХНОЛОГИЯ LTE, СЕАНС ПЕРЕДАЧИ ГОЛОСА, ОПЕРАТОРЫ, МАРШРУТИЗАЦИЯ, БАЗОВЫЕ, ВРЕМЯ СОЕДИНЕНИЯ, ЗАГРУЖЕННОСТЬ КАНАЛА.

Объект исследования – технологии передачи голоса в сетях LTE.

В работе рассмотрены особенности архитектуры сетей четвертого поколения мобильной связи LTE, взаимосвязанная структура транспортных и логических каналов. Выполнен общий обзор технологий передачи голоса в сетях LTE. Проведен анализ и подробное изучение наиболее подходящих методов.

Также в работе приведены результаты экспериментального исследования выбранной технологии на основе сети LTE компании «Киевстар». Представленные расчеты технологических характеристик радиointерфейса стандарта LTE. Предлагается оптимальный вариант решения проблемы организации голосовых услуг в сети LTE и обосновывается целесообразность внедрения выбранной технологии.

Проведен расчет технологических характеристик сети LTE и рассчитана и исследована оценка показателей качества обслуживания заявок в сети LTE

## THE ABSTRACT

Explanatory note: 72 p., 17 fig., 8 tabl., 24 sources.

LTE TECHNOLOGY, VOICE TRANSFER, OPERATORS, ROUTE, BASE STATION, CONNECTION TIME, LOCATION OF THE CHANNEL.

Object of study - voice technology in LTE networks.

The paper discusses the architecture features of the fourth generation mobile networks LTE, the interconnected structure of transport and logical channels. A general overview of voice technology in LTE networks is provided. The analysis and detailed study of the most suitable methods.

The work also presents the results of an experimental study of the selected technology based on the Kyivstar LTE network. The presented calculations of the technological characteristics of the LTE radio interface. The optimal solution to the problem of organizing voice services in the LTE network is proposed and the feasibility of implementing the selected technology is substantiated.

The technological characteristics of the LTE network are calculated and the service quality indicators for applications in the LTE network are calculated and investigated

## ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень, символів, одиниць і термінів .....	8
Вступ.....	9
1 Технологія LTE.....	11
1.1 Опис технології.....	11
1.2 Аналіз особливостей побудови мереж LTE.....	13
1.3 Організація інформаційних каналів.....	20
1.4 Аналіз основних зовнішніх факторів, що впливають на ефективність LTE мереж.....	21
1.5 Основні види атак на елементи мереж зв'язку стандарту LTE.....	24
2 Реалізація передачі голосу в мережі LTE .....	26
2.1 Загроза з боку OTT-сервісів.....	26
2.2 Способи вирішення з видами технологій передачі голосу .....	26
2.2.1 Circuit Switched Fall-Back .....	27
2.2.2 Voice Over LTE Generic Access .....	30
2.2.3 IMS-based Voice Services .....	31
2.3 Аналіз і порівняння.....	37
3 Експериментальна частина .....	40
4 Розрахунок технологічних характеристик мережі .....	45
4.1 Розрахунок пікової швидкості передачі.....	45
4.2 Динамічний діапазон.....	47
4.3 Оцінка мовного трафіку в передачі LTE.....	47
5. Оцінка показників якості обслуговування заявок в мережах LTE .....	49
5.1 Аналіз досліджуваної проблеми.....	49
5.2 Аналіз особливостей управління потоками інформації користувача в мобільних мережах .....	50
5.3 Аналіз результатів моделювання радіоканалу між UE і eNodeB .....	53
5.4 Побудова моделі обслуговування неоднорідного трафіку на фрагменті мережі LTE .....	57
5.5 Система рівнянь статистичної рівноваги .....	61
Висновок по роботі .....	70
Перелік джерел посилання .....	71

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ  
І ТЕРМІНІВ

LTE – Long Term Evolution  
W-CDMA – Wideband Code Division Multiple Access  
UMTS – Universal Mobile Telecommunications System  
GSM – Global System for Mobile Communications  
GSA – The Global mobile Suppliers Association  
QOS – Quality of Service  
EPS – Evolved Packet System  
MSCs/VLR – Mobile Switching Center/Visitor Location Register  
E-UTRAN – Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network  
E-UTRA – Evolved Universal Terrestrial Radio Access  
FD-LTE – Frequency Division  
TD-LTE – Time Division  
OFDMA – Orthogonal Frequency-Division Multiple Access  
QPSK – Quadrature phase shift keying  
QAM – Quadrature Amplitude Modulation  
MIMO – Multiple Input Multiple Output  
TTI – Transmission Time Interval  
MAC – Medium Access Control  
RLC – Radio Link Control  
HD – High Definition  
SMS – Short Messaging Service  
SGSN – Serving GPRS Support Node  
GGSN – GPRS Gateway Service Node  
NGMN – Next Generation Mobile Networks  
PDN – Packet Data Network  
APN – Access Point Name  
P-CSCF – Proxy Call Session Control Function  
IMSI – International Mobile Subscriber Identity  
MSISDN – Mobile Subscriber Integrated Services Digital Number  
RRM – Radio Resource Management  
PDN – Packet Data Network)  
APN – Access Point Name  
ISIM – IMS Services Identity Module  
UICC – Universal Integrated Circuit Card

## ВСТУП

Мобільні мережі четвертого покоління, засновані на використанні технологій множинний доступ із ортогональною модуляцією OFDMA і методі просторового кодування сигналу MIMO, вони дають можливість істотно збільшити передачу трафіку від абонентів.

Відмінними рисами цих мереж є: гнучкість архітектури, можливість динамічного зміни топології мережі при підключенні, пересуванні і відключенні мобільних абонентів, висока швидкість передачі інформації, високий ступінь захисту від несанкціонованого доступу, а також відмова від дорогої і не завжди можливою прокладки або оренди оптоволоконного або мідного кабелю. У мережах стандарту LTE керуючі функції перейшли до базових станцій, які, крім обслуговування родючості, стали приймати рішення про маршрутизації абонентського трафіку. При цьому однією з головних проблем є проблема управління трафіком на радіоінтерфейсу з метою забезпечення заданих норм якості (QoS) по кожній наданій послугі більшості абонентів, зокрема, для тих, хто перебуває в роумінгу.

Зростання обсягу мультимедійних мобільних додатків приводить до того, що необхідну якість обслуговування може бути забезпечено тільки при використанні ефективних методів підвищення пропускну здатності радіоінтерфейсу, так як саме при бездротовому доступі виникають різкі перекося навантаження через стохастичного переміщення абонентів. Постійне здешевлення послуг на мобільний зв'язок, поява нових типів абонентських терміналів, розвиток сервісів по адресній передачі потокового відео веде до зростання трафіку реального часу, швидкість якого повинна бути постійною.

Найбільш істотний вплив на управління продуктивністю в мобільних мережах роблять наступні фактори: порушення цілісності інформації команд управління мережевими процесами; блокування інформації; порушення логіки роботи програмного забезпечення. Аналіз результатів роботи існуючих мереж LTE показав, що для їх управління використовується автоматична функція управління мережею SON, яка апаратно вбудовується в обладнання вузлів мережі. Однак ця функція може тільки вводити пороги по числу сполук, не

обмежуючи при цьому швидкість передачі даних, що нерационально, зокрема, при організації роумінгу.

Спочатку моделі оцінки радіоресурсу мобільних мереж включали в себе лише однорідний тип трафіку, для яких були знайдені аналітичні рішення і розроблені рекурентні алгоритми. Пізніше були розроблені алгоритми рішення для різних видів трафіку має постійну швидкість. У зв'язку з появою додатків не потребують постійної швидкості передачі даних, почав проводитися обрахування моделей еластичного трафіку даних. Однак ці дослідження проводилися без урахування схем доступу, що реалізують пріоритетне обслуговування в мультисервісних мобільних мережах четвертого покоління.

Сьогодні майже ні у кого немає сумнівів в тому, що технологія LTE має найбільшу перспективу в ширококутовому мобільному зв'язку. За даними організації Global mobile Suppliers Association (GSA), за станом на 5 грудня 2017 року в світі налічувалося понад 500 операторів зв'язку, які дали зобов'язання з побудови мережі LTE. З них 251 оператор уже запустив мережу в 93 країнах, а до середини 2018 року їхня кількість досягне 260 [1].

Хоча мережа LTE в даний час використовується здебільшого для цілей доступу в Інтернет, звичайно, передача даних буде не єдиною послугою, яка надається в цих мережах. Оператори, як і раніше, отримують основний дохід від телефонії, і навіть незважаючи на швидке зростання трафіку даних, для них дуже важлива можливість збереження послуги передачі голосу і SMS. Проблема в тому, що LTE, передачу голосу не підтримує в тому сенсі, в якому ми це розуміємо на прикладі традиційних мереж GSM / UMTS. Теоретично, завдяки відмінним характеристикам (малі затримки і висока швидкість), мережа в змозі забезпечити той рівень якості мови, який надавали технології попередніх поколінь, а може і краще.

Мета роботи полягає в пошуку рішення для реалізації голосових послуг в мережі LTE. Для досягнення даної мети в роботі необхідно зробити загальний огляд технологій по передачі голосу в мережі LTE.

# 1 ТЕХНОЛОГІЯ LTE

## 1.1 Опис технології

3GPP Long Term Evolution (LTE) – технологія побудови мереж бездротового зв'язку покоління, наступного за 3G, на базі IP–технологій, що відрізняється високими швидкостями передачі даних. Відповідний стандарт розроблений і затверджений міжнародним партнерським об'єднанням 3GPP для забезпечення необхідної смуги пропускання і якості обслуговування (QoS), щоб використовувати додатки, що вимагають передачі великої кількості даних і інформації.

LTE включає вдосконалену систему пакетної передачі, яка складається з оновленої мережі UMTS наземного радіо доступу (EUTRAN) та поліпшеного центру пакетної комутації, а також забезпечить передачу інформації з великою пропускнуою здатністю, низькими затримками і більшою шириною смуги пропускання через спрощену IP архітектуру.

На додаток, LTE був спеціально розроблений для сумісної роботи з усіма існуючими мережами як технологія майбутнього, щоб допомогти провайдерам мобільного зв'язку трансформувати свої мережі відповідно до потреб завтрашньої зв'язку. Він забезпечить більш ефективний і якісний сервіс, як для голосової інформації, так і для передачі даних.

LTE має декілька особливостей і переваг у порівнянні з попередніми стандартами стільникового зв'язку. В тому числі:

- а) Великі пікові швидкості:
  - 1) до 100 Мбітс в напрямку вниз (20 МГц, 2x2 MIMO);
  - 2) до 50 Мбітс в напрямку вгору (20 МГц, 1x2);
- б) Як мінімум 200 активних користувачів голосовими послугами на кожні 5 МГц;
- в) Малі затримки <5 мс;
- г) Смуга пропускання 4G надає смугу пропускання в 4 рази більше, ніж в нинішніх 3G системах;
- г) Покращена спектральна ефективність. Під спектральною ефективністю розуміється те, наскільки вузько використовується смуга пропускання рівнем доступу до бездротової мережі. Поліпшене значення дозволяє більшому

обсягу інформації передаватися по цій смузі пропускання, при цьому число користувачів і сервісів збільшується. Кількість інформації, що передається зростає в середньому в 3 рази в порівнянні з попереднім релізом [2];

д) Поліпшені швидкості передачі на кордоні стільники. Значення спектральної ефективності поліпшується на кордоні сот. Швидкості збільшуються в 2-3 рази в порівнянні з попереднім стандартом;

е) Немає поділу передачі голосу і даних на рівні ядра. Вся мережа використовується для передачі даних по одному каналу IP;

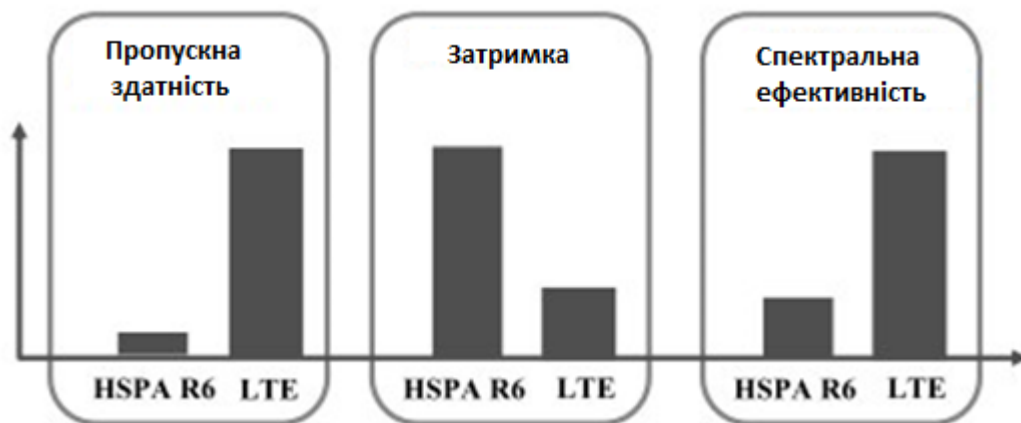


Рисунок 1.1 – Особливості системи LTE

Технологія LTE називається також E-UTRA - розширений універсальний наземний радіодоступ і E-UTRAN – мережа розширеного універсального наземного доступу. Для розгортання мереж стандарту LTE виділено дві смуги частот: одна з них розташована в діапазоні 700 МГц, а друга – 2,1 ГГц. Радіо інтерфейс LTE підтримує обидва методи дуплексного розділення каналів: двобічний режим з частотним поділом (FDD) і двобічний режим з тимчасовим поділом (TDD), часто позначаються FD-LTE і TD-LTE, відповідно.

Особливістю радіо інтерфейсу в лінії «вниз» мережі LTE є використання технології множинного доступу Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA). Інтервал часу передачі (TTI) в лінії «вниз» відповідає тривалості підкадрів і дорівнює 0.5 мс. У лінії «вниз» підтримуються наступні види модуляції: Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) і 64QAM. Також використовується технологія Multi-Input Multi-Output (MIMO). Основна конфігурація технології MIMO

передбачає використання двох передавальних і двох прийомних антен базової станції і мобільного терміналу.

Незважаючи на максимальне значення швидкості передачі даних по низхідному каналу понад 100 Мбіт / с, а по висхідному - більше 50 Мбіт / с, планується суттєве підвищення ефективності використання спектра і продуктивності і значне зниження часу очікування.

## 1.2 Аналіз особливостей побудови мереж LTE

Сьогодні майже ні у кого немає сумнівів в тому, що технологія LTE має найбільшу перспективу в ширококутовому мобільному зв'язку. За даними організації Global mobile Suppliers Association (GSA), за станом на 5 грудня 2017 року в світі налічувалося понад 500 операторів зв'язку, які дали зобов'язання з побудови мережі LTE. З них 251 оператор уже запустив мережу в 93 країнах, а до середини 2018 року їхня кількість досягне 260 [1].

Мережа LTE складається з двох найважливіших компонентів: мережі радіодоступу E - UTRAN і базової мережі EPC (рисунок 1.1) .

Взаємодія мережі LTE з мережами 3GPP (UMTS / GSM / HSPA +) здійснюється як при забезпеченні роумінгу, так і хендовер . Взаємодія мережі LTE з іншими 3GPP мережами, для надання традиційних послуг телефонії , здійснюється за допомогою як традиційною технологією комутації каналів (TDM), так і технології комутації пакетів на базі сервісної підсистеми IMS.

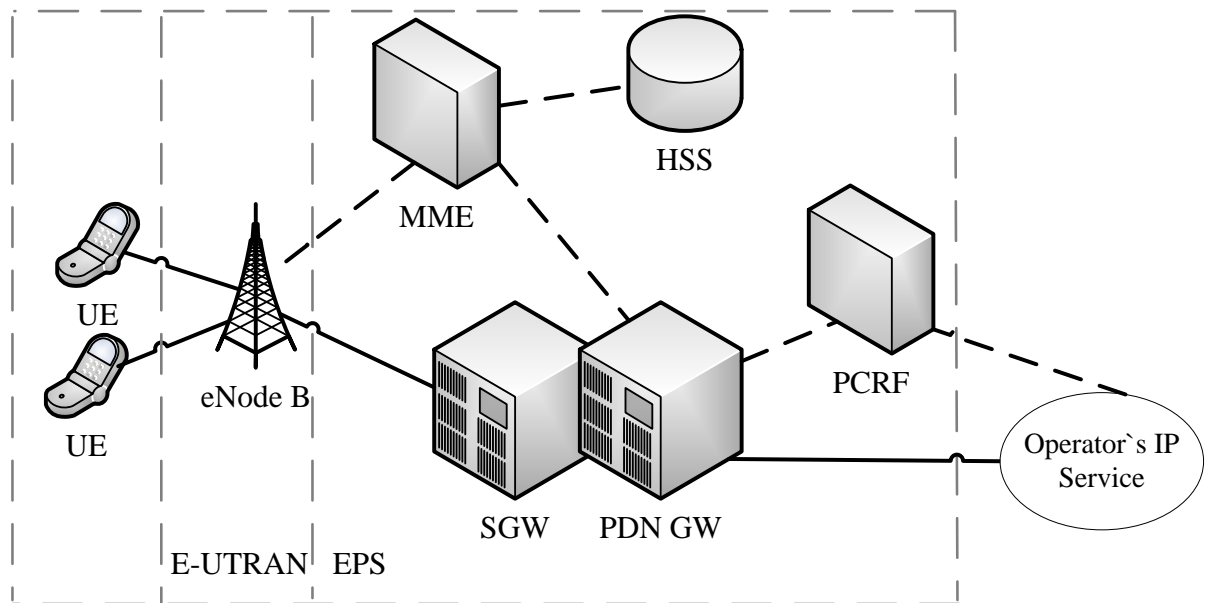


Рисунок 1.2 – Архітектура мережі LTE

До цієї мережі входять елементи, що відповідають за управління, маршрутизацію, комутацію і зберігання різних даних.

Радіочастина мережі (E - UTRAN) складається тільки з базових станцій eNodeB які беруть на себе функції радіоінтерфейсу і є сполучною ланкою між призначеним для користувача обладнанням і мережею передачі даних, на відміну, наприклад, від стандарту GSM, де підсистема базових станцій BSS складалася з базового приймача BTS і контролера базових станцій BSC, тобто в мережі LTE в одному елементі eNodeB об'єднані функції передавача і контролера. Крім цього, все більше виробників обладнання об'єднують функції опорної мережі в єдину платформу, що створює додаткові проблеми з точки зору інформаційної безпеки.

Основними елементами базової мережі EPS є :

- вузол управління мобільністю - MME , який виконує завдань і по управлінню мобільністю абонентського терміналу, управління службою передачі даних, а також управління безпекою мобільного зв'язку. Для управління безпекою в вузол MME інтегровано мережеве сховище даних NAS Security ;
- обслуговуючий шлюз мережі LTE - S - GW , який відповідає за обробку та маршрутизацію пакетів, що надходять з підсистем и базових станцій eNodeB ;

- шлюз для взаємодії з мережами інших операторів - P-GW, він відповідає за передачу голосу і даних від мережі оператора LTE до інших мереж 2G, 3G, які не-3GPP і Internet;
- сервер абонентських даних HSS , де зберігається інформація про абонентів ;
- вузол виставлення рахунків абонентам за надані послуги PCRF ;
- сервер виділення IP -адрес DHCP / DNS .

В даний час поряд з мобільними мережами другого, третього і четвертого поколінь широкого поширення набули високошвидкісні локальні мережі стандарту Wi-Fi, що розгортаються в загальнодоступних системах торгівлі, системах громадського харчування та громадського транспорту і т.д. При цьому з'явилися спільні базові станції, призначені е як для роботи в мережах Wi-Fi, так і в мережах стільникового зв'язку . Все це дозволяє обслуговувати абонентів із застосуванням різних варіантів доступу [22].

У зв'язку з цим в архітектурі SAЕ передбачені механізми вибору найбільш зручною мережі передачі даних для надання абоненту необхідних послуг. При цьому всі сучасні мобільні термінали вибирають, при наявності декількох мереж , передачу трафіку на дозволеній користувачем мережі Wi-Fi, що зазвичай супроводжується перемиканням з однієї технології на іншу і відповідно передачею даних про користувача між мережами.

Ускладнення характеру трафіку, зокрема зниження мовного навантаження в порівнянні з обсягом мультимедійних повідомлень при організації різних видів мобільного доступу призводить до того, що безпека передачі інформації , може бути забезпечений а тільки при використанні ефективних методів підвищення пропускної здатності, так як саме при бездротовому доступі можуть виникати різкі перекося навантаження через стохастичного переміщення абонентів по зонам мобільної мережі , при цьому всі протоколи і схеми взаємодії є від криті ми , а передача даних здійснюється на базі протоколу IP.

Вузол управління мобільністю MME займається обробкою службової інформації: пошуком обслуговуючого шлюзу (S-GW) сигналізацією. Сигнальна навантаження в мережах LTE не обмежена. Нагадаємо, що в мережах LTE для абонентів встановлено такі швидкості передачі: для

статичних, або з невеликою швидкістю - 1 Гбіт / с і для рухомих в транспортному засобі - 100 Мбіт / с. Відомо, що на реальних мережах в даний час через інтерфейс S1-MME проходить 3.5% хендовер від об'єктів, що швидко абонентів. Модуль MME забезпечує зберігання службової інформації про абонента, авторизацію термінальних пристроїв в наземних мережах мобільного зв'язку і загальне управління мобільністю абонентів.

Обслуговуючий шлюз S-GW виконує функції обробки інформаційного трафіку, забезпечує прив'язку призначеного для користувача устаткування до опорної мережі при хендовера. Крім того, шлюз S-GW веде білінгові записи про те, скільки абонент скачав трафіку і з яких серверів. Також шлюз S-GW здійснює маркування трафіку (висхідного (UL) і низхідного (DL)) в транспортній мережі відповідно до рівня якості QoS. Маркування займає 6 біт, при цьому 0 означає найгірше якість.

Пакетний шлюз P-GW забезпечує з'єднання від призначеного для користувача устаткування UE до зовнішніх пакетних мережах передачі даних, будучи точкою входу і виходу трафіку, при цьому для користувача устаткування UE може одночасно з'єднуватися з декількома шлюзами P-GW для одночасного підключення до декількох мереж. Шлюз P-GW виконує також функції захисту, фільтрації пакетів для кожного користувача, підтримку білінгу, узаконеного перехоплення і сортування пакетів. Інша важлива роль шлюзу P-GW-управління мобільністю між сетями 3GPP і не-3GPP технологіями, такими як WiMAX і 3GPP2 (CDMA 1X і EvDO).

Сервер абонентських даних HSS є великою базою даних. Він зберігання даних про абонентів і замінює набір реєстрів VLR, HLR, AUC і EIR в мережах 2 і 3 поколінь. У сервері HSS здійснюється аутентифікація та реєстрація абонентів, завантаження профілю абонента в MME, забезпечуються роумінгові обмеження і обмеження сервісів за типами мереж доступу (в даний час деякі сервіси доступні тільки в мережах LTE). При цьому сервер HSS підключається до ядра пакетної мережі по інтерфейсу протоколу Diameter, а не на базі системи сигналізації SS7], яка використовувалася в мережах GSM і UMTS. Сигналізація для забезпечення COPM також заснована на протоколі Diameter.

Вузол управління нарахуванням плати PCRF виконує функції: контролю за наданням послуги (gatingcontrol - початок надання послуги, зміна її

параметрів, завершення надання послуги і т.п.) і контролю якості, при якому здійснюється безперервний моніторинг якості, а також підтримання заданих характеристик (QoS), причому не тільки для голосових з'єднань, але і для пакетних сервісів.

В даний час поряд з мобільними мережами широкого поширення набули високошвидкісні локальні мережі стандарту Wi-Fi, що розгортаються в загальнодоступних системах торгівлі, громадського харчування, транспорту (кафе, аеропорти, магазини) і т.д. Розробляються базові станції, що дозволяють обслуговувати абонентів із застосуванням різних варіантів доступу як для роботи в мережах Wi-Fi, так і в мережах стільникового зв'язку. У зв'язку з цим, в архітектурі призначеного для користувача рівня SAЕ передбачені механізми вибору найбільш зручну інфраструктуру надання послуги, необхідної абоненту. Таким чином, створюється нова мережа радіодоступу, що значно збільшує швидкість передачі даних і зменшує час встановлення з'єднань. Наявність загального ядра в мережі дозволяє підтримувати мобільні послуги не тільки за технологією LTE, але також і за іншими радіотехнологіями (Wi-Fi, WIMAX, CDMA2000 і ін.) Завдяки інтегрованості різних інтерфейсів передачі даних [3].

Для додатків реального часу, передбачається on-line тарифікація, при якій абонент і оператор можуть відстежувати стан рахунку в реальному масштабі часу. Технологія дозволяє застосовувати кілька моделей нарахування плати, зокрема: за наданим обсягом послуг, по витраченому на послугу часу, за фактом надання послуги, також є комбіновані моделі. Вузол PCRF виконує всі зазначені функції і в разі, коли абонент знаходиться за межами зони операторської мережі.

При знаходженні абонента в мережі одного оператора IP-адреса користувацького обладнання змінюватися не повинен, таким чином, базова станція eNodeB завжди «знає» всі IP адреси даної мережі, отже, може посилати тегованих трафік.

В даний час в рамках однієї зони оператора в межах великого міста знаходиться два ММЕ і приблизно 7000 базових станцій eNodeB, але максимально в один ММЕ може включатися до 30000 портів eNodeB. До однієї базової станції eNodeB одночасно можуть бути підключені до 800 абонентів. Передача мови і даних в мережах LTE може здійснюватися з різними

ступенями стискання. Передбачена функція адаптація модуляції, кодування і швидкості (Link adaptation), яка може змінювати тип кодека стиснення мови в режимі реального часу, в залежності від умов роботи каналу. Тип кодека для передачі мови, залежить від умов на радіо мережі. При невиконанні мінімальних умов якості радіоканалу, відбувається розрив з'єднання.

У мережах LTE на базових станціях eNodeB використовується модифікований алгоритм управління потужністю передавачів обладнання користувача, який враховує положення абонента всередині стільники: чим ближче користувач до eNodeB, тим вище відношення сигнал / шум використовується для регулювання потужності. Таким чином, поблизу eNodeB обладнання користувача працює з більш високим співвідношенням сигнал / шум, а значить і з більш високою швидкістю кодування і кратністю модуляції, що збільшує швидкість передачі.

У мережах LTE використовується адаптивне розподіл смуги передачі, яке забезпечує гнучкий розподіл ресурсних блоків відповідно до заданого якості наданої послуги (QoS). Алгоритм адаптивного розподілу смуги передачі виділяє користувачам на краю стільники меншу кількість ресурсних блоків відповідно до спектральної щільності потужності сигналу. Точність оцінки спектральної щільності впливає на оптимальність виділення користувачеві необхідного ресурсу.

У мережах LTE-Advanced абонентське обладнання UE (для користувача устаткування) може для передачі даних зв'язуватися відразу з двома станціями eNodeB, що дозволяє знизити відношення сигнал / шум.

Для визначення найбільш прийнятних способів передачі даних користувача на фрагменті мережі LTE, проведемо аналіз існуючих методів підвищення пропускної здатності інформаційних мереж.

Функції захисту інформації в мережах LTE стандартизовані і здійснюються на декількох рівнях. Є захист на рівні доступу користувача до мережі, на рівні додатків, а також на рівні конфігурацій. При цьому кожен рівень на відміну від мережі Інтернет здійснює аутентифікацію і авторизацію всіх пристроїв. Відомо, що кожен пристрій в IP-мережі має свою адресу, а також і унікальний ідентифікатор MAC, але їх досить легко змінити і підробити. Технологія LTE використовує для всіх пристроїв, підключених до мережі, не тільки IP-адреси, а й системи поширення передачі ключів

шифрування. Все це дозволяє організувати в мобільній мережі безпечний обмін ключами і встановлення шифрованого каналу зв'язку між елементами мережі.

У мережах LTE зберігаються так само методи аутентифікації по прив'язці користувачів до карти USIM. Як і в традиційній мобільного зв'язку користувач може заблокувати доступ до телефону по PIN-коду. У мережах LTE успадковані від мереж GSM і UMTS алгоритми протоколів аутентифікації, але до них додані довші ключі і розширена ієрархія інфраструктури відкритих ключів - PKI. Також передбачені нові можливості у сценаріях міжмашинної взаємодії M2M і одноразової аутентифікації SSO. Передбачена, крім того, захист від несанкціонованих з'єднань поверх мультимедійної платформи IP-мережі - IMS.

Однак, багато проблем, що виникають при перевантаженні мережі LTE, зокрема: втрата доступності і втрата цілісності інформації, ще не вирішені. У даній дисертаційній роботі розглядається спосіб підвищення пропускної спроможності мобільної мережі стандарту LTE, а саме - динамічне управління потоками інформації користувачів. Для конкретизації завдання, проведемо аналіз способів динамічного управління потоками в мережах LTE.

Динамічне управління потоками має на увазі під собою управління вхідної та вихідної навантаженнями на вузлах мобільної мережі (таких як MME, S-GW, PGW, PCRF, HSS / DNS / GW см. П.1.1), а також адаптивну диспетчеризацію його програм. Динамічне управління потоками на мережі LTE займаються алгоритми управління самооптимізації мережі SON.

У вдосконаленій архітектурі SAE введені дві принципово нові функції: перша-автоматичної самооптимізації управління мережею SON, які виникли через вимоги до складних мережевих мультітехнологіям, що передбачає інтеграцію 2G, 3G, 4G і WiMAX і друга-використання в мережі більш дрібних нових ієрархій, таких як піко- і фемто- стільники. Функції SON стандартизовані в рамках 3GPP [20], вони є природним розвитком алгоритмів адаптивного управління, які вже використовуються в системах IMT-2000 (наприклад, динамічне управління потужністю випромінювання, планування ресурсів радіомережі RRCі т.п.) і дозволяють розширювати область автоматизації процесів управління мережі в цілому. Однак, вбудовування даної функції так і не було вироблено жодним оператором мережі через

помилки по пріоретизації трафіку виникають при частковому розгортанні даної функції на мережі].

Інтенсивне зростання трафіку міжмашинної взаємодії, ставить перед операторами завдання оптимізації доступу до ресурсів мережі. Компанія Еріксон представила прогноз динаміки підключення абонентів до мереж фіксованого і мобільного ширококутного доступу до 2020р., Який показує збільшення трафіку від міжмашинної взаємодії в два рази за найближчі два роки.

Технологія LTE в силу особливостей побудови радіоінтерфейсу є найбільш придатною для застосування алгоритмів динамічного управління пропускнуою спроможністю мереж. Тому проведемо розгляд і аналіз методів управління пропускнуою спроможністю в стаціонарних і мобільних мережах з метою постановки задачі розробки оптимального методу управління.

### 1.3 Організація інформаційних каналів

Для того щоб дані могли бути транспортовані через інтерфейс радіо LTE, використовуються різні «канали». Вони використовуються для того, щоб виділяти різні типи даних і дозволити їм транспортуватися через мережу доступу більш ефективно. Використання декількох каналів забезпечує інтерфейс більш високого рівня в рамках протоколу LTE і включають більш чітку і визначену сегрегацію даних. Є три категорії, в які можуть бути згруповані різні канали передачі даних:

Логічні канали – надають послуги середнього рівня управління доступом MAC в межах структури протоколу LTE. Логічні канали на кшталт переданої інформації діляться на логічні канали керування і логічні канали трафіку. Логічні канали керування використовуються для передачі різних сигнальних та інформаційних повідомлень. За логічним каналам трафіку передають призначені для користувача дані.

Транспортні канали – транспортні канали фізичного рівня пропонують передачу інформації в MAC і вище. Інформацію логічних каналів після обробки на RLC / MAC рівнях розміщують в транспортних каналах для подальшої передачі по радіо інтерфейсу в фізичних каналах. Транспортний

канал визначає, як і з якими характеристиками відбувається передача інформації радіо послуги. Інформаційні повідомлення на транспортному рівні розбиваються на транспортні блоки. В кожному часовому інтервалі передачі (Transmission Time Interval, ТТІ) радіо послуга передається хоча б один транспортний блок. При використанні технології МІМО можлива передача до чотирьох блоків в одному ТТІ.

Фізичні канали – це канали передачі, які переносять призначені для користувача дані і керуючі повідомлення. Вони змінюються між висхідним і спадним потоками, оскільки кожен з них має різні вимоги і діє по-своєму.

До сучасних бездротових систем зв'язку ставляться жорсткі вимоги щодо забезпечення високої пропускної здатності і перешкодозахищеності.

Перш за все, необхідно відзначити деяку умовність поняття "мережі LTE", під якою всупереч вимогам однозначної критеріальності в технічній термінології розуміють і систему, і мережу, і, нарешті, мережеву технологію четвертого покоління. Мережі LTE є подальшим розвитком мереж UMTS третього покоління. На відміну від багатьох телекомунікаційних систем, для яких специфікації (навіть якщо їх досить велика кількість) мають чітко виражені "перелічуваних і призначеного", технічна документація на систему UMTS є колосальна кількість різноманітних документів, що розробляються в рамках міжнародного консорціуму 3GPP (3rd Generation Partnership Project) і відкрито публікуються на сторінках всесвітнього форуму [www.3gpp.net](http://www.3gpp.net). Такі документи згруповані у відповідні серії за ознакою спільності будь-якого аспекту. Технічні специфікації, які стосуються безпосередньо до мереж LTE, виділені в 36-ту серію [4].

#### 1.4 Аналіз основних зовнішніх факторів, що впливають на ефективність LTE мереж

Одним із зовнішніх факторів, що впливають на продуктивність мережі, є загрози безпеки. Акценти загроз технології LTE змістилися, тепер всі вони пов'язані з протоколом IP. Якщо в 3G голосовий трафік і дані передавалися по двом різним мережам - по мережі з комутацією каналів і по мережі передачі даних, то в мережах 4G весь трафік проходить через єдину архітектуру EPS по протоколу IP (рисунок 1.3).

При цьому мережа LTE накладає деякі обмеження на продуктивність. Зокрема, при збільшенні швидкості підключення знижується радіус дії станції eNodeB - в середньому для LTE він становить близько 5 км (це залежить від використовуваного частотного діапазону: 800 МГц або 2600 МГц). При цьому число цих станцій в мережі стає більше, і вони починають розташовуватися все ближче і ближче один до одного. Зауважимо, що при цьому визначення місця розташування абонента за сигналами станцій eNodeB (триангуляція) працює точніше. З одного боку - оператор точніше знає місцезнаходження абонента, але з іншого боку, сервіси геопозиціонування (Location-BasedService, LBS) можна використовувати і для стеження за абонентом, що створює небезпеку нових загроз.

Збільшення щільності розміщення мережевого обладнання для поліпшення покриття (рисунок 1.4) призводить до появи на мережі LTE фемто і навіть пікосоти, які сам користувач або підприємство може встановити у себе. Але при цьому поява нових мережевих елементів може призводити до атак на них і на канали зв'язку з іншою мережею. В даний час ще не зрозуміло, хто буде конфігурувати і забезпечувати безпеку цих фемтосот: оператор мережі або окремі фірми, що займаються їх обслуговуванням, користувач, який їх набуває, або оператор, до чийої мережі вони підключаються. Потрібно враховувати також, що базові станції eNodeB стають все більш інтелектуальними, наприклад, у версії REL10 вони отримали можливість маршрутизувати трафік.

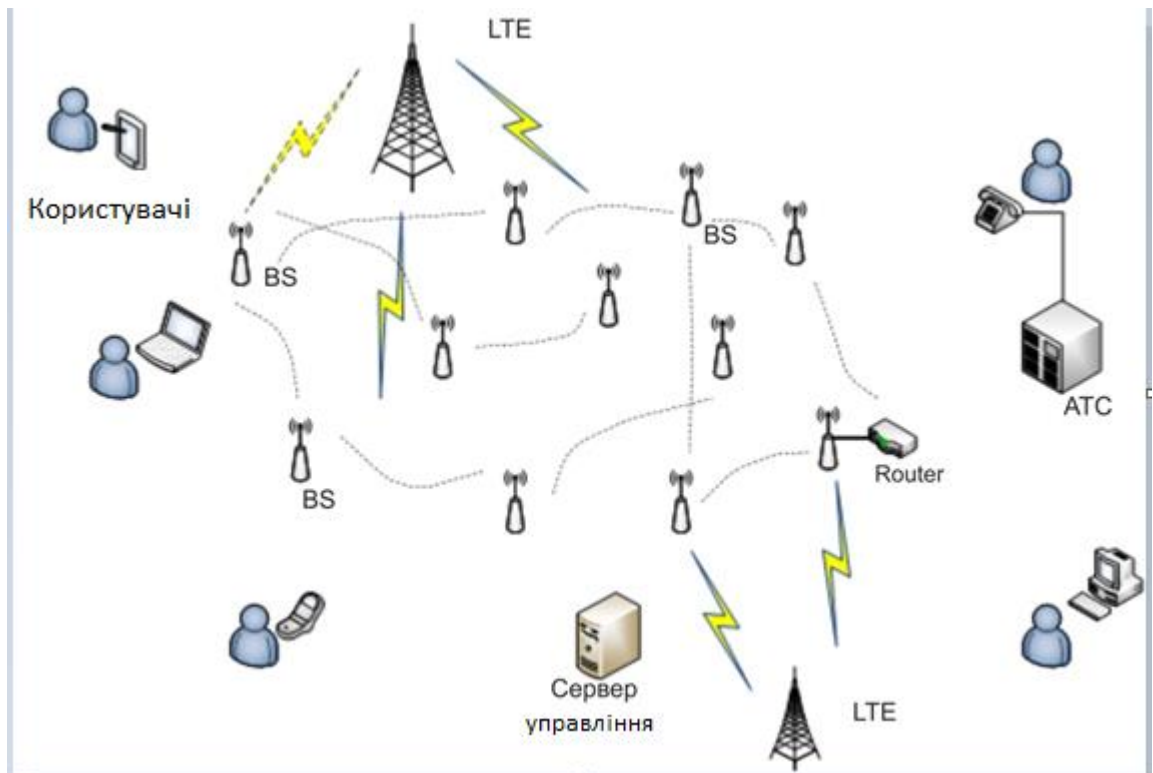


Рисунок 1.3 – Підключення різних абонентів до мережі

У мережах LTE-Advanced з архітектури мережі LTE зникло поняття контролера радіомережі (RNC), який виконував функцію з управління комунікаційними ресурсами. Для того щоб здійснити атаку на інфраструктуру мереж попередніх поколінь, необхідно було отримати доступ до цього контролеру, а це було пов'язане з труднощами з фізичного доступу. Керуючі функції перейшли до базових станцій, які тепер, крім обслуговування родючості, стали приймати рішення про маршрутизації всього надійшов до них трафіку від абонентів. Це дозволило організовувати з'єднання між близькими абонентами безпосередньо, минаючи ядро мережі, що істотно розвантажує міжвузловими навантаження на опорній мережі. Але при цьому у зловмисників з'являється можливість атакувати самі станції eNodeB, які працюють тільки по протоколу IP, що полегшує несанкціонований доступ. Можуть бути використані класичні атаки на каналному рівні, ширококомвні шторми, створення фальшивого вузла eNodeB і інші варіанти нападів, при цьому трафік буде мати властивість однорідності, отже, необхідно вводити обмеження на швидкості його передачі, або пороги на число з'єднань.

Питання забезпечення безпеки в мережах четвертого покоління вирішуються на кількох структурних рівнях: на фізичному (так званому

повітряному інтерфейсі), на рівні внутрішньої мережі оператора, а також на рівні взаємодії різних операторів.

Розглянемо основні види атак на елементи мереж зв'язку стандарту LTE.

### 1.5. Основні види атак на елементи мереж зв'язку стандарту LTE

Існує два варіанти атак: пасивний варіант, коли зловмисник прослуховує канал зв'язку між мобільним пристроєм і базовою станцією, або активний варіант, коли на додаток до прослуховування, зловмисник впливає на вже циркулює трафік, вносячи в нього модифікації. В даний час можливості активних атак істотно знижені за рахунок застосування криптографічного захисту переданої інформації, але пасивні атаки, такі як аналіз трафіку і відстеження місця розташування користувачів, все ще можливі.

Стандарти попередніх поколінь мобільного зв'язку GSM, UMTS і стандарт LTE для захисту ідентифікаторів мобільних пристроїв в повітряному інтерфейсі використовують непридатні для фальсифікації тимчасові ідентифікатори (TMSI, GUTI). Але неповне розгортання мережі LTE по всій території робить ці заходи недостатніми для забезпечення гарантованого рівня захисту користувачів [5].

Крім того, існують: атаки типу підміна довіреного об'єкта, атаки на мережеві служби з використанням Інтернет протоколів, атаки-повідомлення про неправдиве розташування іншим особам або атаки несанкціонованої переконфігурації радіоапаратури. Вони ускладнюють процес управління для оператора мережі LTE інтерференцією, що несприятливо позначається на якості обслуговування.

Ще одна особливість мережі LTE полягає в тому, що ця технологія орієнтована також на підключення інтелектуальних користувача пристроїв з LTE-модемами: персональних комп'ютерів, планшетів, смартфонів і т.д. Це означає, що в міру збільшення в мережі LTE числа інтелектуальних пристроїв число нападів на них буде зростати. Очевидно, що ці інтелектуальні телефони можуть бути більш широкому колу загроз. Поширення вірусів у відкритих комп'ютерних платформах, наприклад, Android стає все більш масштабним, а продукція Apple і Microsoft також вразлива для шкідливих програм. В мобільні мережі перейшли всі загрози з провідних мереж: атаки на мережі, розсилка спаму, перехоплення відео і звуку з камери мобільного пристрою і т.д.

Однак, атаки можуть відбуватися не тільки на призначене для користувача устаткування. Все більше стає популярною технологія меж машинної взаємодії (M2M), за допомогою якої здійснюється взаємодія різних бездротових інтелектуальних пристроїв (вендрінг, датчики сигналізації і т.д.) мають LTE-модеми, які здійснюють передачу даних і управляються через мережі бездротового зв'язку.

Загрози для користувачам мереж LTE можуть так само виходити і від сервісів подвійного призначення. Відомо, що мобільні оператори накопичують багато цінної інформації про абонентів (місце розташування, інтереси на основі Інтернет запитів, і т.д.). Це, в кінцевому рахунку, може призводити до монетизації інформації. Типовим прикладом є LBS-сервіси - тип інформаційних та розважальних послуг, заснованих на визначенні поточного місця розташування мобільного телефону. Їх можна використовувати, наприклад, для контролю за переміщенням вантажів або громадського транспорту, для визначення місцезнаходження дітей і для оповіщення про надзвичайні ситуації, але їх же можна використовувати і для незаконного стеження за абонентом. Злом кожного такого сервісу дозволить отримувати доступ до цінної інформації провайдера і побудувати нові схеми злочинів.

## 2 РЕАЛІЗАЦІЯ ПЕРЕДАЧІ ГОЛОСУ В МЕРЕЖІ LTE

### 2.1 Загроза з боку OTT-сервісів

Подальшого впровадження послуг VoLTE може перешкоджати надання голосових OTT-послуг. На сьогоднішній день існує і використовується спосіб голосового зв'язку за допомогою OTT (Over-the-Top) сервісів, таких як Skype, Google Voice, WhatsApp, Viber і т.д. Ці сервіси абсолютні безкоштовні. Мережа передачі даних, в основі якої лежить IP, дає зручний транспорт для абсолютно різних послуг і виводить управління ними за межі зони відповідальності оператора до самих користувачам. З розвитком технологій (перехід на 4G) OTT-провайдери збільшують привабливість своїх сервісів, наприклад, забезпечують підтримку голосу і відео високої роздільної здатності (HD), що посилює проблему.

Але такий спосіб не задовольняє користувачів, так як ці сервіси не гарантують стабільну, якісну роботу. Справа в тому, що вони повністю покладаються на інтернет, а інтернет-доставка пакетів здійснюється за принципом "Best effort" (сервіс надання з'єднання без гарантій) [9]. Незважаючи на популярність, як торгових марок, так і компаній-власників OTT-послуг, споживачі часто нічого не можуть вдіяти в разі їх поганої нестійкої роботи або навіть їх тимчасової відсутності. Постачальники OTT-сервісів не можуть контролювати, точніше, впливати на доступність і якість послуг. Труднощі також виникають і з підтримкою користувачів: писати доведеться на будь-якому іноземною мовою, час реакції залежить від пріоритетів постачальника і його можливостей.

### 2.2 Способи вирішення з видами технологій передачі голосу

З кожним днем з'являється все більше способів для вирішення проблеми передачі голосу в мережі LTE. Проаналізувавши ситуацію на ринку, були знайдені більш десятка таких рішень. Шляхом аналізу, були виділені найперспективніші способи, спираючись на світовий досвід:

- Circuit Switched Fall-Back (CSFB);

- Voice over LTE Generic Access (VoLGA);
- IMS-based Voice Services (VoIMS).

І кожне з цих рішень має свої переваги і недоліки.

### 2.2.1 Circuit Switched Fall-Back

CSFB - це технологія, яка дає можливість організувати дзвінки з LTE-пристроїв і на них через стандартні мобільні мережі з комутацією каналів. Стандарт вводить новий інтерфейс між MME в LTE і MSCs / VLR в мережі GSM / UMTS [10].

Суть механізму CSFB полягає в тому, що абонентський пристрій, що працює в мережі LTE, на час здійснення вихідного або прийому голосового виклику перемикається в традиційну мережу GSM або UMTS. А сесія передачі даних через LTE на цей час або припиняється з відновленням після завершення виклику, або також переходить в GSM / UMTS. Очевидно, що для роботи CSFB обов'язково перекриття радіомереж LTE і GSM / UMTS. Також необхідна підтримка CSFB на абонентському обладнанні і на комутаторах мобільного зв'язку (MSC). На MSC реалізується спеціальний інтерфейс в бік обладнання LTE / EPC, який призначений для пейджинга абонентських пристроїв і управління їх перемиканням між мережами LTE і GSM / UMTS, а також для доставки вхідних і вихідних SMS. При цьому доставка SMS через цей інтерфейс здійснюється без перемикання абонентських пристроїв в GSM / UMTS.

Механізм CSFB дозволяє операторам використовувати існуючі комутатори за умови їх обмеженою модернізації. Абонентам ж надається повний набір традиційних послуг, доступних з MSC, включаючи базові голосові виклики та додаткові види обслуговування, доставку SMS, виклики з попередньою оплатою та інтелектуальні послуги. Однак технологія CSFB має кілька недоліків. Витрати на модернізацію всіх MSC для підтримки CSFB можуть виявитися вельми і вельми значними. Необхідність перемикання в GSM / UMTS призводить до помітного збільшення затримки встановлення голосових з'єднань, як при вихідних, так і при вхідні дзвінки. А внаслідок припинення сесії передачі даних або зниження швидкостей до рівня GSM / UMTS у абонента може створюватися враження, що під час голосового виклику сесія передачі даних переривається.

Основні характеристики технології:

- Вимагає модернізації MME і MSC для сигналізації та SMS;
- Потрібно перекриття зон GERAN / UTRAN і E-UTRAN;
- Процедура перемикання в CircuitSwitch-домен пов'язана з помітним збільшенням затримки при встановленні голосового з'єднання;
- Збільшення затримки при встановленні голосового з'єднання;
- Деградація сесій передачі даних до швидкостей 2.5G / 3G;
- Термінал після завершення виклику, назад в мережу LTE переходить не відразу.

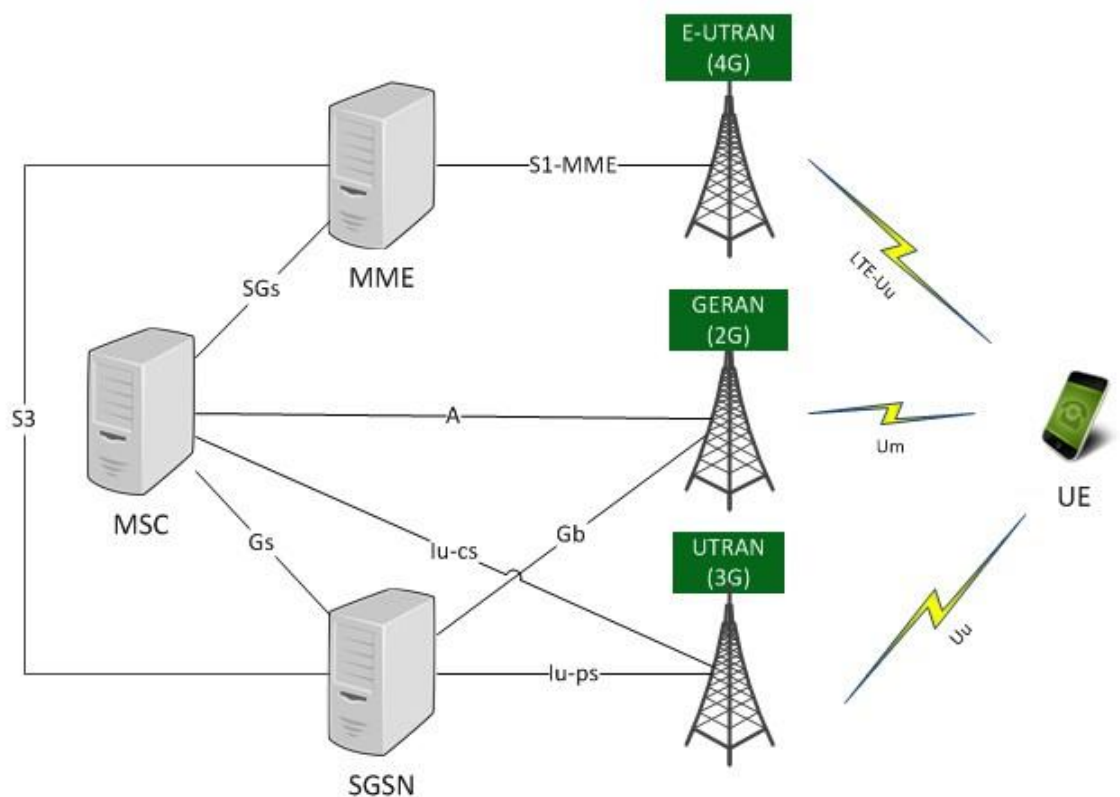


Рисунок 2.1 – Спрощена архітектура EPS-мережі для організації CS fallback, заснована на використанні інтерфейсу SGs

Особливості обладнання підтримує CS fallback:

UE повинен мати доступ і до E-UTRAN / EPC, і до CS домен через мережу GERAN і / або UTRAN.

MME використовує LAI і hash-значення, що отримується з IMSI, для визначення номера VLR, в разі, якщо даний LAI обслуговують кілька MSC / VLR, в SGSN використовується це ж hash-значення / функція [6].

Реєстрація терміналу. При реєстрації термінал, якщо він підтримує CSFB і налаштований на його використання, здійснює комбінований "Location Update", тобто крім реєстрації в LTE-сегменті термінал "реєструється" в MSCs / VLR через новий SGs-інтерфейс. Даний алгоритм не відрізняється принципово від використовуваного нині, якщо в мережі встановлено відповідний режим роботи, MME для MSCs представляється як SGSN.

Для реєстрації в 2G / 3G, MME повинен передати в VLR поточне значення Location Area ID (ідентифікатор географічної області, в якій знаходиться абонент), якого насправді немає і LA ID обчислюється з Tracking Area ID (TAI, аналог LAI в мережі LTE) . Оскільки пошук абонента при пейджинг буде виконуватися в Tracking Area, а MSCs / VLR знає тільки LAI - значення LAI і TAI повинні корелювати (простіше кажучи - бажано збігатися).

Вхідний дзвінок. Вхідний CS-дзвінок (наприклад, дзвінок з PSTN або з GSM-телефону) надходить на MSCs, який знає в якій LAI знаходиться абонент, а також бачить, що термінал "доступний" через SGSN (точніше, через MME, що для MSCs - одне і також). MSCs відправляє сигнал про пейджинг (з конкретним LAI) в сторону MME через SGs-інтерфейс, далі в MME LAI перераховується в TAI і пейджинг по LTE радіомережі доставляється до терміналу.

Якщо в момент пейджинга термінал і мережею - можливо 2 варіанти: "призупинення" передачі даних (з відновленням після закінчення дзвінка) або хендовер даних в 2G / 3G (швидше за все в 3G, оскільки режим одночасної передачі даних і голосу в GSM не отримав поширення).

Якщо в момент пейджинга термінал не обмінюється даними з мережею - хендовер даних в мережу 2G / 3G не потрібен, виконується "виштовхування" терміналу в мережу 2G / 3G і термінал відгукується на пейджинг вже через 2G та 3G.

При виконанні хендовера (або "виштовхування") базова станція LTE (eNodeB) отримує інформацію про станції 2G / 3G з терміналу або користується заздалегідь прописаними для роботи з базовою станцією eNodeB сусідніми 2G / 3G станціями. Якщо, проте, термінал перейшов в "неправильний" LAC - можливий Location Update в цій LAI і далі перенаправлення дзвінка в цю нову LAI.

Вихідний дзвінок. Термінал повідомляє мережі про бажання зробити CSзвонок. З боку MME запускається процедура по звільненню LTEресурсів і

переходу в 2G / 3G мережу. Після звільнення LTE-ресурсів термінал виконує Location Update в 2G / 3G і далі звичайним чином встановлюється CS-дзвінок.

Для отримання / відправки СМС не потрібно перехід в 2G / 3G мережу. СМС відправляються і доставляються через SGs-інтерфейс між MME і MSCs і далі SMS-центр.

Відправлення ж USSD-повідомлень виконується після переходу терміналу в 2G / 3G мережу, перехід виконується аналогічно нагоди "Вихідний дзвінок" [7].

Очевидною перевагою даного варіанту організації VoLTE є максимальне перевикористання існуючої архітектури і (на відміну від VoLGA) існуючих процедур, оскільки для 2G / 3G CS Domain весь EPS сегмент, видимий через SGs, подається усього-лише ще одним SGSN, а процедури пейджінга через SGSN, Location Update через SGSN - відомі і успішно працюють в нинішніх мережах.

Як недолік зазвичай вказується збільшення часу встановлення з'єднання, називається мінімальна додаткова затримка в 1.5 секунди.

### 2.2.2 Voice over LTE Generic Access

Форум VoLGA запропонував інше рішення. Воно покликане забезпечити голосові послуги і послуги передачі повідомлень через мережу LTE на основі існуючих стандартів GSM / UMTS. Ідея рішення VoLGA полягає в тому, що абоненти VoLGA представляються комутатора MSC звичайними абонентами GSM / UMTS. Всі необхідні перетворення специфічної сигналізації VoLGA і мовних пакетів VoIP в домені LTE в зрозумілу для MSC сигналізацію і мовні канали зі звичайним для мереж зв'язку тимчасовим поділом виконує спеціальний шлюз доступу в мережу VoLGA. З точки зору MSC цей шлюз - звичайний контролер базових станцій мережі GSM BSC (Base Station Controller) або контролер радіомережі UMTS RNC (Radio Network Controller), причому інтерфейси - знову ж стандартні A і Iu-CS. Для LTE він представляє собою якість IP-пристрій, куди через PDN-GW можна передати сигнальні і трафіковий IP-пакети по інтерфейсу SGi (аналогом цього інтерфейсу в 2G / 3G є Gi-інтерфейс, що йде від GGSN до зовнішнього світу). Для роботи в мережі VoLGA природною вимогою є підтримка процедур і протоколів VoLGA на абонентських пристроях.

Рішення VoLGA дозволяє операторам використовувати встановлені комутатори MSC без будь-якої їх модернізації і надавати абонентам весь набір традиційних послуг, доступних з MSC. Однак при всій своїй уявній привабливості воно не отримало широкого визнання в мобільній індустрії. Незважаючи на те, що це рішення було публічно продемонстровано на останньому Всесвітньому Конгресі GSM, архітектура VoLGA фактично перейшла в заморожене стан, особливо після публікації рекомендацій NGMN про застосування CSFB. Причина проста: оператори прагнуть запобігти фрагментацію мереж і виключити проблеми з роумінгом, неминучі при реалізації несумісних методів VoLTE.

VoLGA дозволяє в значній мірі перевикористати поточний обладнання 2G / 3G мереж, а саме - MSC / MSCs, MGW, HLR / HSS.

Радіомережа 2G / 3G є не обов'язковою, хоча хендовери з / в LTE - підтримуються. Устаткування, яке має бути доопрацьовано для роботи з VoLGA - абонентський термінал. Новий елемент - VANC (VoLGA Access Network Controller). Все інше обладнання – стандартне.

VoLGA базується на стандартизованій 3GPP вирішенні UMA / GAN (Unlicensed Mobile Access / Generic Access Network).

- Туннелювання сигналізації даних 2G / 3G через LTE до VANC через IPsec і далі до MSC (A / Iu);
- Зберігаються традиційні послуги;
- Підтримується хендовер (handover - перехід) в 2G / 3G;
- Підтримується поруч постачальників обладнання, але в основному просувається силами T-Mobile, Alcatel-Lucent, Kineto Wireless і ZTE;
- Всі послуги надаються через LTE / EPS без перемикання в CSдомен.

### 2.2.3 IMS-based Voice Services

IMS - це інфраструктура на основі протоколів VoIP поверх мережі передачі даних LTE / EPC. IMS являє собою програмно-апаратний комплекс, який є ключовим компонентом практично всіх IPсетей наступного покоління (Next Generation Network, NGN), що підтримують SIP-додатки, і призначається для забезпечення стандартизації мультимедійних сервісів у всіх взаємопов'язаних мережах. Завдяки універсальній архітектурі одна і та ж IMS-

платформа може бути використана для додатків і послуг в мобільних мережах всіх поколінь (2G, 3G, 4G), а також в фіксованих мережах.

Причому саме в мережах фіксованого зв'язку концепція IMS з'явилася спочатку - як інструмент скорочення числа мереж великих операторів (і, відповідно, витрат) за рахунок міграції на IP (масштабний проект British Telecom в середині 2000-х). Пізніше, у міру стрімкого старту LTE, основний інтерес до IMS змістився в бік підтримки голосових (VoLTE) і «розширених» мультимедійних послуг [8].

IMS-мережа дозволяє створити кілька ключових механізмів взаємозв'язку між мережами замість створення окремих угод на кожен послугу окремо. Це дозволяє уникнути дублювання функцій і знизити витрати операторів.

Одним з найважливіших драйверів впровадження IMS є необхідність підтримки голосових послуг в мережах LTE (VoLTE).

Основні переваги IMS:

- Забезпечення взаємодії різного типу мереж;
- Можливість розробки і швидкого впровадження нових послуг, включаючи VoLTE;
- Забезпечення якості надання послуг (QoS);
- Точне виставляння рахунків;
- Зниження витрат на експлуатацію;
- Масштабованість рішень.

Поява і розвиток мереж LTE. Різке зростання споживання мобільного трафіку даних, гостра конкуренція і високий попит на послуги мобільного ШСД вимагає впровадження дорогих технологій LTE і LTE Advanced. Розвиток мереж 4G, в свою чергу, стимулює операторів до впровадження технології IMS, оскільки вона дає можливість впроваджувати голосові послуги на мережах LTE (VoLTE) та інші сервіси.

Архітектура IMS зазвичай ділиться на три горизонтальних рівня:

- Транспортний (рівень абонентських пристроїв і шлюзів);
- Управління викликами і сеансами (функція CSCF і сервер абонентських даних);
- Рівень додатків.

Транспортний рівень організовує сеанс зв'язку за допомогою сигналізації протоколу ініціації сеансу і забезпечує транспортні послуги з

конвертацією голосу з аналогового або цифрового сигналу в IP-пакети використанням протоколу RTP.

Рівень управління викликами і сеансами здійснює управління сеансами зв'язку.

Рівень послуг містить набір серверів додатків, які вже можуть не бути елементами IMS, і включає до свого складу як мультимедійні IP-додатки, що базуються на протоколі SIP, так і додатки, які реалізуються в мобільних мережах на базі віртуальної домашньої середовища.

Отримання IP адреси. IMS по своїй назві передбачає постійну доступність терміналу по IP (IP connectivity), тобто термінал повинен отримати IP-адресу, за якою з ним можна зв'язатися. У IMS процедури отримання терміналом IP-адреси по суті не змінилися (в порівнянні з GSM / UMTS), хоча раніше не використовувалися механізми будуть більш затребувані в IMS. У мережах GSM / UMTS коннективність терміналу забезпечується RAN і SGSN / GGSN. Якщо абонент в домашній мережі - все зрозуміло, якщо ж абонент в візитною мережі - в цьому випадку використовується SGSN візитною мережі і, як правило, домашній GGSN. Оскільки для будь-яких IP сервісів термінал видно через GGSN - весь трафік до / від терміналу йде через домашній.

Цей варіант зображений на малюнку 2.2 праворуч. З точки зору IMS не грає ролі вид мережі доступу, тобто в разі використання LTE - буде та ж картина. Цей варіант навіть дозволяє надавати IMS-сервіси в не-IMS мережах на основі GPRS-роумінгу, коли термінал (відповідно до правої картинкою) має коннективність з домашніми пристроями і значить з IMS-доменом.



Рисунок 2.2 – Підключення IMS під час роумінгу

Варіант на правому зображенні відмінний, проте ганяти користувача трафік до домашньої мережі і назад - нерозумно, неефективно і просто дорого. Відповіддю може з'явитися інший варіант, який ви бачите на малюнку 2.2 зліва, при якому коннективність терміналу забезпечується візитною мережею, тобто на відміну від попереднього прикладу, GGSN теж візитна. Крім GGSN, візитна мережа надає точку входу в IMS, візитна PCSCF, який в свою чергу буде спілкуватися з домашнім IMS доменом абонента. Після досягнення коннективності терміналу, можна починати процедуру реєстрації терміналу в IMS домені.

Реєстрація терміналу в мережі IMS є для мережі LTE / SAЕ одним з багатьох "зовнішніх" сервісів, що працюють поверх IP. Фактично це означає, що термінал виконує роздільну реєстрацію в EPC (Evolved Packet Core) і IMS. Процедура реєстрації терміналу в EPC однакова для будь-яких сервісів, що працюють over LTE (наприклад для IMS і VoLGA), тобто запит на реєстрацію приходить в MME, MME йде в HSS, отримує дані і відбувається реєстрація терміналу в EPC. Після реєстрації в EPC, термінал (точніше, IMS додаток на терміналі) повинен виконати реєстрацію в IMS домені, для чого необхідно визначити PDN (Packet Data Network), яка використовується для сервісу IMS. У терміналі явно конфигурируется APN (Access Point Name), за допомогою якого визначається необхідна PDN. Далі відбувається спілкування терміналу з PCSCF і реєстрація терміналу в IMS домені.

Ідентифікація користувача. У IMS вводиться новий тип карт - ISIM (IMS Services Identity Module). Точніше, вводиться новий тип "додатка", яке зберігається на UICC (Universal Integrated Circuit Card), при цьому на одній UICC теоретично може одночасно бути присутнім кілька "додатків".

На картці з ISIM міститься наступна інформація:

- Private User Identity (аналог IMSI в GSM / UMTS)
- Public User Identity (аналог MSISDN в GSM / UMTS), їх у абонента може бути кілька;
- Home Network Domain URI - домашній домен користувача, використовується при реєстрації картки для визначення адреси, на який відправляти запит про реєстрацію в мережі;
- Long Term Secret - використовується для аутентифікації і обчислення ключів шифрування.

Очевидно, що найкращим варіантом в мережі IMS є використання ISIM, проте реєстрація в IMS можлива і з використанням USIM (звичайні SIM не підтримуються через відсутність Long Term Secret), тобто найбільш перспективним варіантом буде якраз використання USIM для реєстрації одночасно в LTE і в IMS.

#### Передумови впровадження IMS

Конкуренція між існуючими операторами мобільного зв'язку залишається дуже високою, на ринку відбуваються активні процеси злиттів і поглинань (M & A). Нерідко консолідуються компанії - провайдери різного типу послуг (фіксована і мобільна телефонія, мобільна телефонія і кабельне телебачення і т.п.). Технологія IMS допомагає їм об'єднувати всі типи мереж в одну, реалізувати комплекс послуг і сервісів, що поєднує в собі можливості мобільного і фіксованого зв'язку на базі однієї платформи (конвергентні послуги) і забезпечити операторам зростання ARPU і збільшення доходів.

Очевидною тенденцією світового ринку телекомунікацій є зростання капітальних витрат операторів.

Вважається, що IMS в довгостроковій перспективі дозволить операторам скоротити капітальні (CAPEX) і операційні (OPEX) витрати за рахунок використання єдиної IP-мережі і відкритої IMS-архітектури. Крім того, оператори зможуть швидко і з малими витратами виводити на ринок нові послуги. Однак на початковому етапі впровадження IMS операторам, очевидно, доведеться збільшити свої витрати [9].

#### Світовий ринок обладнання IMS

Основні драйвери і стримуючі фактори. Згідно з даними опитування сервіс-провайдерів, проведеного Infonetics Research в 2016 р, ключовими драйверами впровадження IMS стало розгортання LTE-мереж, а також можливість надання на базі IMS конвергентними послуг та створення єдиного стандарту.



Рисунок 2.3 – Основні драйвери впровадження IMS

Стримуючі фактори розвитку:

- розвиток OTT-сервісів;
- висока вартість і тривалість розгортання мережі;
- технологічні складнощі з розгортанням мережі;
- складності в розвитку FMC, пов'язані з законодавчим регулюванням діяльності;
- мобільних і фіксованих операторів;
- фрагментованість частотного спектра для LTE-мереж.

За прогнозами Alan Quaule, до 2017 р. вже близько 50% операторів стільникового зв'язку впровадять рішення IMS. Найбільш затребуваним розгортання мережі IMS стане для мобільних операторів - до 2017 року їх частка серед компаній, які впроваджують IMS, виросте з 15% до 50%.

Ключовим фактором стимулювання попиту на додаткові послуги є простота використання і якість з'єднання. Згідно з опитуванням, проведеним наприкінці 2013 р компанією Cisco, абонентами найбільш затребувані такі послуги: розпізнавання мови, передача мультимедіаконтента, переклад голосового зв'язку в реальному часі та ін.

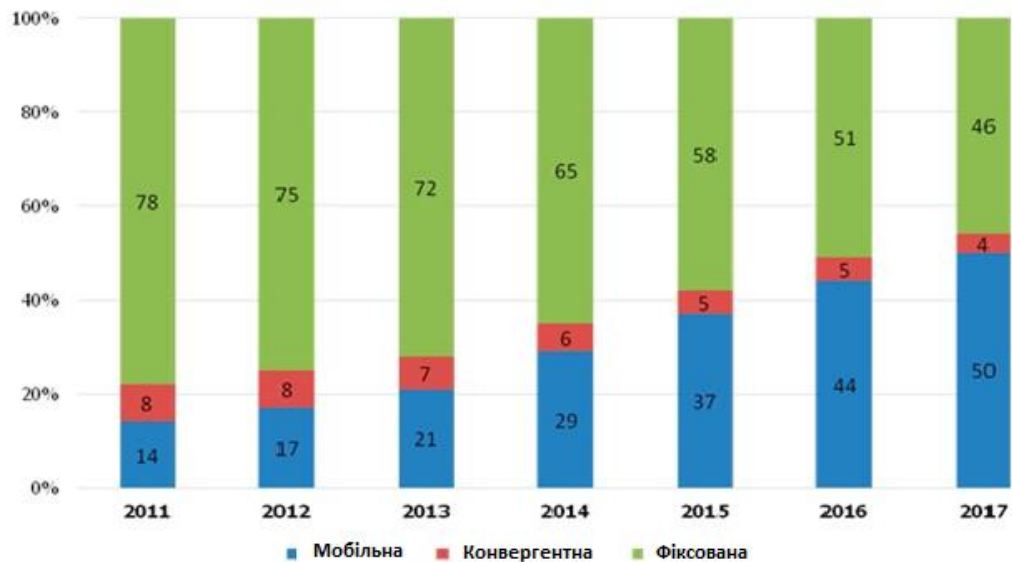


Рисунок 2.4 – Розбивка телекомунікаційних операторів, що впровадили або впроваджують IMS, за типом послуг, що надаються

### 2.3 Аналіз і порівняння

У роботі розглядалася мережу LTE оператора «Київстар». Мережа складається з понад 500 базових станцій. Головна частина (EPC - Evolved Packet Core) знаходиться в Києві і пов'язана зі станціями за допомогою мережі МВН (Mobile Backhaul).

Також «Київстар» має повністю розгорнуту мережу третього покоління з покриттям по всій Україні.

На основі цих даних визначимо найбільш відповідне рішення реалізації голосових послуг в мережі.

Таблиця 2.1 – основні недоліки та переваги розглянутих технологій, які вплинуть на вибір

	<b>CS Fallback</b>	<b>VoLGA</b>	<b>IMS</b>
Преваги	<p>Перевикористання існуючого обладнання - MSC / VLR</p> <p>Працює в 2G / 3G</p>	<p>Перевикористання існуючого GSM / UMTS обладнання без будь-якої доопрацювання</p> <p>Досить просте рішення для забезпечення міжнародного роумінгу</p> <p>Всі послуги надаються через LTE / EPS без перемикання в CS домен</p>	<p>Перехід до IP протоколів при передачі всіх видів трафіку, в тому числі голосового;</p> <p>Відсутність необхідності використання двох портів абонентської ємності для надання послуг телефонії та передачі даних;</p> <p>Надання нових послуг і традиційних телефонних послуг абонентам</p>
Недоліки	<p>Навантаження на MME</p> <p>Модернізація MME, MSC</p> <p>Помітне збільшення затримки при встановленні голосового з'єднання</p> <p>Затримка переходу терміналу назад в мережу LTE після завершення виклику</p>	<p>Дане рішення не підтримується провідними виробниками обладнання</p> <p>Не має підтримки в 3GPP</p> <p>Потрібні нові процедури і обладнання</p> <p>На абонентському обладнанні потрібен спеціальний софт клієнт</p>	<p>Технологія вимагає великих вкладень</p> <p>Складна реалізація впровадження всієї системи IMS</p> <p>Немає підтримки мобільності 2G / 3G</p>

Відмінності в реалізації підтримки голосових викликів в мережах 4G (LTE) - один з чинників, що затримують їх широке поширення по всьому світу. Оскільки вендори зацікавлені в просуванні "свого", розробленого компанією, або прийнятого за зразок варіанту реалізації, повнотою уявлень в області того, які є варіанти, володіють не всі фахівці операторів стільникового зв'язку.

VoLGA і CSFB - цей спроба надати голосові сервіси шляхом повернення до паче не потрібного в all-IP мережі CS домену. Навіщо це планується - зрозуміло. Це і перевикористання існуючого обладнання, і ясні і відпрацьовані роками механізми інтерконекту та роумінгу, можливість безболісної інтеграції різних сервісів, які є і працюють зараз, і простота та прозорість в забезпеченні міжсистемних хендовера з LTE в UMTS / GSM і т.д. [10].

Проаналізувавши ситуацію, стає зрозумілим, що використання IMS - єдине рішення для довгострокової перспективи, яке зможе в повній мірі розкрити потенціал нових all-IP мереж. Дану систему можна буде впроваджувати тільки після суцільного покриття мережею LTE, що найближчим часом - не реалізовується.

Проблеми в розгортанні IMS не тільки в технічних аспектах, а й у зміні поглядів у всій індустрії - відмова від комутації каналів і повний перехід на IP. А це міграція сервісів, політик і взаємодій з традиційними мережами.

Технологія VoLGA складна в реалізації в порівнянні з CSFB. Для впровадження VoLGA необхідне нове обладнання, в той час як для CSFB - тільки модернізація існуючого обладнання. Також VoLGA не стандартизовані і не підтримується двома провідними виробниками обладнання (з трьох) - Ericsson і Nokia-Siemens Networks. Використовує її на даний момент тільки один оператор - T-Mobile. З цього випливає, що у технології немає перспектив, і як варіант, він - невідповідний.

Володіючи розгорнутої мережею третього покоління, для ближньої перспективи пропонується найбільш оптимальний підхід до передачі голосу через LTE - використання CSFB. Для оператора такий еволюційний підхід забезпечить плавний перехід до мережі наступного покоління і дозволить зберегти абонентів, що користуються мережею попереднього покоління.

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Обрана технологія має важливий недолік - затримка перед встановленням голосового з'єднання. Саме величина затримки і можливі фактори, що впливають на неї, експериментально досліджується в роботі.

Експеримент полягав у вимірі часу встановлення голосового з'єднання між абонентським терміналом, підключеним до мережі LTE і абонентським терміналом, підключеним до мережі попереднього покоління (GSM, UMTS).

При проведенні експерименту використовувалася імітаційна модель, в основі якої лежало програмне забезпечення «HUAWEI Local Maintenance Terminal». Дана програма дозволяє ставити на трасування канали сигналізації. Таким чином, повністю відслідковується процедура встановлення голосового з'єднання.

Завдяки трасування, були отримані дані про послідовність обміну сигнальними повідомленнями між елементами мереж (call flow) для встановлення голосового з'єднання, з точним зазначенням часу кожної дії. І вже, за допомогою цих даних було розраховано час встановлення голосового виклику.

No.	Time	RFN	Trace Type	Direction	Message Type	Report Condition	Option	Subtrack/Slot/SubSystem
1	2018-05-16 17:05:31 (39)	260873	ABIS Interface(Circuitry)	up link	Channel Required	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
2	2018-05-16 17:05:31 (39)	260873	ABIS Interface(Circuitry)	down link	Channel Activation	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
3	2018-05-16 17:05:31 (39)	260873	ABIS Interface(Circuitry)	up link	Channel Activation Acknowledge	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
4	2018-05-16 17:05:31 (39)	260873	ABIS Interface(Circuitry)	down link	Immediate Assign Command	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
5	2018-05-16 17:05:31 (39)	260873	UM Interface(Circuitry)	down link	Immediate Assignment	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
6	2018-05-16 17:05:31 (39)	260873	ABIS Interface(Circuitry)	up link	Establish Indication	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
7	2018-05-16 17:05:31 (39)	260873	A Trace	up link	Location Updating Request	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
8	2018-05-16 17:05:31 (39)	260873	A Trace	down link	Classmark Request	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
9	2018-05-16 17:05:31 (39)	260873	A Trace	down link	Identity Request	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
10	2018-05-16 17:05:31 (39)	260873	ABIS Interface(Circuitry)	down link	Data Request	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
11	2018-05-16 17:05:31 (39)	260873	UM Interface(Circuitry)	down link	Classmark Enquiry	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
12	2018-05-16 17:05:31 (39)	260874	ABIS Interface(Circuitry)	down link	Data Request	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
13	2018-05-16 17:05:31 (39)	260874	UM Interface(Circuitry)	down link	Identity Request	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
14	2018-05-16 17:05:31 (39)	260874	UM Interface(Circuitry)	up link	Classmark Change	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
15	2018-05-16 17:05:31 (39)	260874	ABIS Interface(Circuitry)	up link	Data Indication	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
16	2018-05-16 17:05:31 (39)	260874	A Trace	up link	Classmark Update	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
17	2018-05-16 17:05:31 (39)	260874	UM Interface(Circuitry)	up link	Utran Classmark Change	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
18	2018-05-16 17:05:31 (39)	260874	ABIS Interface(Circuitry)	up link	Data Indication	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
19	2018-05-16 17:05:31 (39)	260874	UM Interface(Circuitry)	up link	GPRS Suspension Request	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
20	2018-05-16 17:05:31 (39)	260874	ABIS Interface(Circuitry)	up link	Data Indication	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
21	2018-05-16 17:05:31 (39)	260874	UM Interface(Circuitry)	up link	Classmark Change	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
22	2018-05-16 17:05:31 (39)	260874	ABIS Interface(Circuitry)	up link	Data Indication	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
23	2018-05-16 17:05:31 (39)	260874	A Trace	up link	Classmark Update	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
24	2018-05-16 17:05:31 (39)	260874	UM Interface(Circuitry)	up link	Utran Classmark Change	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
25	2018-05-16 17:05:31 (39)	260874	ABIS Interface(Circuitry)	up link	Data Indication	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054
26	2018-05-16 17:05:31 (39)	260874	UM Interface(Circuitry)	up link	Identity Response	Cell ID:6992	0x2011f0b	1.0.2054

Рисунок 3.1 – Інтерфейс програмного забезпечення «HUAWEI LMT»

У таблицях 3.1 і 3.2 представлені результати вимірювання часу встановлення вихідного / вхідного голосового виклику в залежності від того, в яку мережу відбувається перемикання (UMTS / GSM).

На підставі даних таблиць 3.1 і 3.2 були побудовані гістограми залежностей часу встановлення голосового з'єднання від того, на яку мережу відбувається перемикання виклику. Це час так само залежить від напрямку виклику (вихідний, вхідний). Тому розглядаються вони окремо.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку часу встановлення вихідного дзвінка

Тип мережі	UMTS	GSM
Звичайний виклик	4000 мс	3900 мс
Виклик з CSFB	6530 мс	6460 мс

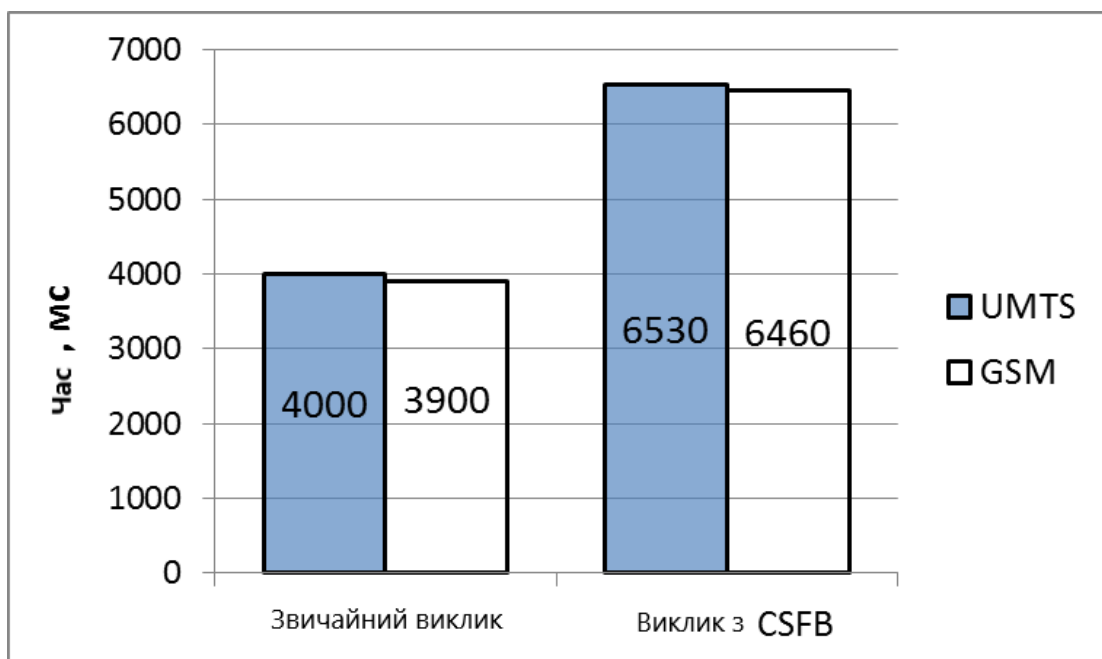


Рисунок 3.2 – Час встановлення вихідного дзвінка

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку часу встановлення вихідного дзвінка

Тип мережі	UMTS	GSM
Звичайний виклик	2640 мс	2500 мс
Виклик з CSFB	5170 мс	5060 мс

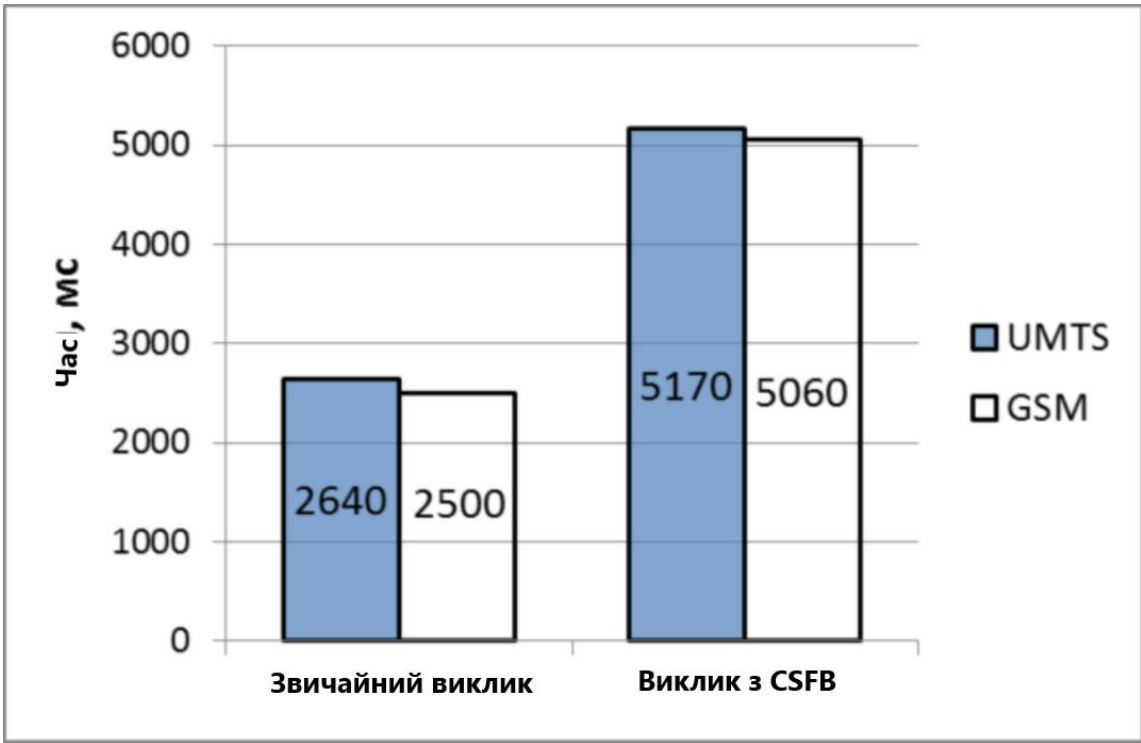


Рисунок 3.3 – Час встановлення вхідного дзвінка

З малюнків 3.2, 3.3 видно, що з застосуванням технології CSFB установка голосового з'єднання відбувається довше на 2.5 секунди, незалежно від напрямку виклику та типу мережі, на яку відбувається перемикання виклику.

На рисунку 3.4 зображено завантаженість одного з каналів мережі LTE оператора «Київстар» за добу.

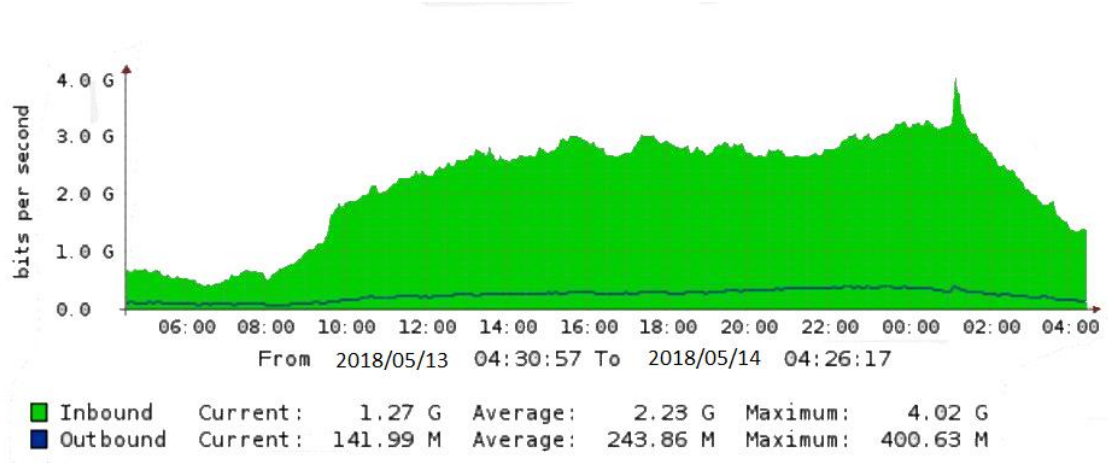


Рисунок 3.4 – Завантаженість одного з каналів мережі LTE оператора «Київстар» за добу

З рисунку 3.4 видно, що завантаженість мережі залежить від часу доби.

Для побудови залежності, в моменти максимальної, мінімальної та середньої завантаженості мережі були проведені 5 вимірювань і розрахована затримка встановлення вихідного голосового з'єднання.

У таблиці 3.3 відображені результати вимірів і розрахунку затримки, а також математичного очікування і відхилення.

Таблиця 3.3 – Результати вимірювання і розрахунку затримки в різний час доби

Час виміру	Завантаженість, Гбіт/с	Рез-тат 1, мс	Рез-тат 2, мс	Рез-тат 3, мс	Рез-тат 4, мс	Рез-тат 5, мс	Мат. очік., мс	Мат. відх, %
6:30	0,50	2530	2530	2531	2531	2529	2530,2	0,84
8:30	0,75	2532	2530	2532	2531	2532	2531,4	0,89
10:30	2,00	2534	2533	2532	2535	2533	2533,4	1,14
14:00	2,50	2535	2537	2536	2538	2534	2536	1,58
18:00	2,90	2538	2537	2539	2538	2537	2537,8	0,84
1:00	3,20	2539	2538	2539	2538	2537	2538,2	0,84
1:07	3,70	2540	2541	2540	2542	2540	2540,6	0,89
1:15	4,10	2543	2545	2542	2544	2544	2543,6	1,14

На рисунку 3.5 зображена залежність затримки від завантаженості мережі на підставі даних таблиці 4.3

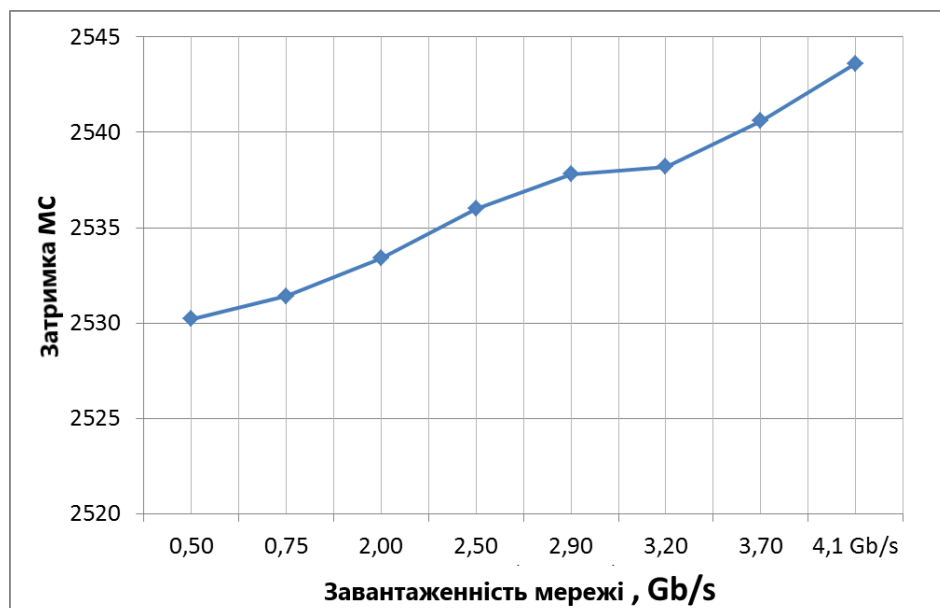


Рисунок 3.5 – залежність затримки від завантаженості мережі

З рисунку 3.5 видно, що зі збільшенням завантаженості, збільшується і затримка. Час, який необхідно для встановлення голосового з'єднання збільшується (менше 1%), але зміни настільки малі, що непомітні для абонента. З цього випливає, що такий фактор, як завантаженості мережі, незначно впливає на затримку.

Час встановлення голосового з'єднання із застосуванням технології CSFB збільшилася з 4 до 6,5 секунд, незалежно від типу мережі, на яку відбувається перемикання виклику. Немає ніяких даних, доставить ці 2.5 секунди затримки незручності для абонентів. Але і для цього можливого нестачі компанія HUAWEI розробляє новий стандарт ULTA-flash CSFB. За заявою розробників, стандарт набагато зменшить час встановлення голосового з'єднання (на 20% менше ніж у традиційних мережах) завдяки введенню нового інтерфейсу.

## 4 РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕРЕЖІ

### 4.1 Розрахунок пікової швидкості передачі

Швидкості передачі, як в нижньому напрямку, так і в верхньому, розраховуються на базі стандартів 3GPP. Залежно від кількості передавачів і приймачів антен MIMO, швидкість розраховується по-різному. В даному проекті залежить від антени MIMO конфігурації 2x2. Вибирається значення ITBS в залежності від типу модуляції (QPSK, QAM-16, QAM-64). Потім в за кількістю ресурсних блоків ( $NPRB = 100$ ) і ITBS вибирається шукане значення пікової теоретичної швидкості

Таблиця 4.1 – Значення пікових теоретичних швидкостей

MCS Index <sub>MCS</sub>	Modulation Order $Q_m$	TBS Index <sub>TBS</sub>
0	2	0
1	2	1
2	2	2
3	2	3
4	2	4
5	2	5
6	2	6
7	2	7
8	2	8
9	2	9
10	4	9
11	4	10
12	4	11
13	4	12
14	4	13
15	4	14
16	4	15
17	6	15
18	6	16
19	6	17
20	6	18
21	6	19
22	6	20
23	6	21
24	6	22

Продовження таблиці 4.1

25	6	23
26	6	24
27	6	25
28	6	26
29	2	Reserved
30	4	
31	6	

У таблицю 4.2 занесемо процес знаходження пікових швидкостей.

Таблиця 4.2 – Знаходження пікових швидкостей

$I_{TBS}$	$N_{PRB}$									
	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
0	2536	2536	2600	2600	2664	2664	2728	2728	2728	2792
1	3368	3368	3368	3496	3496	3496	3496	3624	3624	3624
2	4136	4136	4136	4264	4264	4264	4392	4392	4392	4584
3	5352	5352	5352	5544	5544	5544	5736	5736	5736	5736
4	6456	6456	6712	6712	6712	6968	6968	6968	6968	7224
5	7992	7992	8248	8248	8248	8504	8504	8760	8760	8760
6	9528	9528	9528	9912	9912	9912	10296	10296	10296	10296
7	11064	11448	11448	11448	11448	11832	11832	11832	12216	12216
8	12576	12960	12960	12960	13536	13536	13536	13536	14112	14112
9	14112	14688	14688	14688	15264	15264	15264	15264	15840	15840
10	15840	16416	16416	16416	16992	16992	16992	16992	17568	17568
11	18336	18336	19080	19080	19080	19080	19848	19848	19848	19848
12	20616	21384	21384	21384	21384	22152	22152	22152	22920	22920
13	23688	23688	23688	24496	24496	24496	25456	25456	25456	25456
14	26416	26416	26416	27376	27376	27376	28336	28336	28336	28336
15	28336	28336	28336	29296	29296	29296	29296	30576	30576	30576
16	29296	30576	30576	30576	30576	31704	31704	31704	31704	32856
17	32856	32856	34008	34008	34008	35160	35160	35160	35160	36696
18	36696	36696	36696	37888	37888	37888	37888	39232	39232	39232
19	39232	39232	40576	40576	40576	40576	42368	42368	42368	43816
20	42368	42368	43816	43816	43816	45352	45352	45352	46888	46888
21	45352	46888	46888	46888	46888	48936	48936	48936	48936	51024
22	48936	48936	51024	51024	51024	51024	52752	52752	52752	55056
23	52752	52752	52752	55056	55056	55056	55056	57336	57336	57336
24	55056	57336	57336	57336	57336	59256	59256	59256	61664	61664
25	57336	59256	59256	59256	61664	61664	61664	61664	63776	63776
26	66592	68808	68808	68808	71112	71112	71112	73712	73712	75376

Результати занесемо в таблицю 4.3

Таблиця 4.3 – Розрахунок пікових швидкостей при ширині п / п 20 МГц

Напрямок	MIMO схема	Модуляція	Пікова швидкість передачі
DL	2x2	64-QAM	150552
UL	2x2	16-QAM	61152

#### 4.2 Динамічний діапазон

Вимоги до динамічному діапазону - це міра потужності приймача для прийому необхідного сигналу при наявності інтерференційного сигналу всередині прийнятого частотного каналу, при задоволених вимогах до пропускної спроможності. Мета даної вимоги полягає в забезпеченні того, що базова станція може підтримати високу пропускну здатність при наявності підвищеної інтерференції і високих рівнях сигналу.

Ця вимога вимірює ефект спотворень при прийомі і здійснюється при високих значеннях с / ш. Середня потужність інтерференційного сигналу (AWGN) становить порогового рівня шуму приймача, збільшеного на 20 дБ для того, щоб приховати власний пороговий рівень шуму приймача. Обчислення середнього значення потужності необхідного сигналу наводяться нижче, з урахуванням рівня шуму 5 дБ, ІМ 2,5 дБ.

$$P_{\text{dln}} = -174 + 10 * \log (N_{\text{RB}} * 180 * 10^3) + 20 + \text{NF} + \text{SNR} + \text{IM}. \quad (4.1)$$

$$P_{\text{dln}} = -174 + 10 * \log (100 * 180 * 10^3) + 20 + 5 + 9,8 + 2,5 \text{ дБм}.$$

#### 4.3 Оцінка мовного трафіку в мережі LTE

На основі статистичних даних наведених на офіційному сайті міста Харків, населення становить 1 475 579 осіб . Максимальна місткість ринку за кількістю абонентів використовують послуги мереж третього покоління

оцінюється як 40% від загальної кількості потенційних абонентів. На сьогоднішній день з 15 219 тис чоловік стільниковим зв'язком користуються 14 713 тис. Цей суперечливий факт пояснюється тим, що абоненти користуються послугами декількох операторів. Тому при розрахунку абонентів ми не враховуємо що кількість жителів до 14 років (які не є потенційними абонентами) і не віднімаємо їх загальної кількості жителів. На підставі вище сказаного потенційна кількість абонентів мають потребу в послугах наданих мережами четвертого покоління буде

$$N_{аб} = N_{жит} * 0,3. \quad (4.2)$$

$$N_{аб} = 1475579 * 0,3 = 442673.$$

Розрахуємо число одночасного говоріння абонентів

$$A = A_{пор} * N_{аб}. \quad (4.3)$$

де  $A_{пор} = 0,05$  Ерл - навантаження одного абонента в годину найбільшого навантаження;  $N_{аб} = 442673$  - кількість абонентів.

$$A = 0,05 * 442673 = 22133 \text{ Ерл.}$$

У нас вийшла навантаження 22133 Ерл, вона еквівалентна 22133 одночасно розмовляють абонентів ( $N_{од} = 22133$  чоловік).

## 5 ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗАЯВОК В МЕРЕЖАХ LTE

### 5.1 Аналіз досліджуваної проблеми

Рівнодоступний радіоресурс фрагменту мережі LTE при перевантаженнях можуть приводити до істотного падіння пропускної здатності фрагмента мережі LTE. Це відбувається при їх захопленні більш інтенсивними потоками окремих класів користувачів і повного блокування інших користувачів. Локальне управління на вузлах, що обмежують обсяг ресурсів, найбільш типово для перевантажень, викликаних різким збільшенням інтенсивності потоку викликів на одне або кілька вихідних напрямів вузла. У даній роботі запропоновано спосіб підвищення пропускної спроможності мобільної мережі стандарту LTE, а саме - динамічне управління потоками інформації користувача, що має на увазі управління вхідних та вихідних навантаженнями на вузлах мобільної мережі, таких як MME, S-GW, PGW, PCRF, HSS / DNS / GW, а також адаптивну диспетчеризацію їх програм. Управління в мережі LTE здійснює автоматична функція мережі SON, яка включає в себе три основних принципи: самоконфігурації, самооптимізації і самовідновлення. Принцип самоконфігурації, передбачає зменшення настроюються вручну процесів при плануванні, налаштування і введення в експлуатацію нового абонентського обладнання eNB, що забезпечує більш швидке розгортання мережі.

Для вибору чисельних значень мінімально і максимально допустимої швидкості передачі еластичного трафіку, необхідно розробити сукупність математичних моделей, які б підвищували ефективність спільного надходження і обслуговування заявок на передачу різнорідного трафіку сучасних комунікаційних додатків і провести дослідження побудованої моделі, після чого сформулювати рекомендації щодо застосування отриманих результатів. Проведемо аналіз побудови мережі стандарту LTE [11].

## 5.2 Аналіз особливостей управління потоками інформації користувача в мобільних мережах

На вузлах мобільної мережі LTE (таких як MME, S-GW, PGW, PCRF, HSS / DNS / GW застосовується управління, відповідно до якого обмежується або загальне число викликів на вузлі, або обсяг ресурсів, що виділяються для користувачів з різними класами обслуговування SLA .

Динамічним управлінням потоками на мережі, займаються алгоритми SON (Self Organizing Networks).

У вдосконаленій архітектурі SAE введені дві нові функції: автоматичної самооптимізації управління мережею SON, які виникли через вимоги до складних мережевих мультитехнологій, що передбачає інтеграцію 2G, 3G, 4G і WiMAX і функція ієрархічного управління в мережі, реалізована як піко-, так і в фемто - сотах.

Функції самоврядування SON стандартизовані в рамках консорціуму 3GPP, вони є природним розвитком алгоритмів адаптивного управління, які вже використовуються в системах IMT-2000, зокрема, можливо динамічне управління потужністю випромінювання, планування ресурсів радіомережі RRC і т.п. Саме ці функції дозволяють розширити область автоматизації процесів управління мережі в цілому.

При цьому перший принцип SON-самоконфігурація дозволяє налаштовуватися на будь-яку з існуючих мережевих структур:

- централізовану, при якій алгоритми функцій SON розміщені в елементах системи управління на окремому сервері, який керує базовими станціями eNodeB; така архітектура є вразливою з точки зору надійності;
- розподілену, при якій алгоритми функцій SON реалізовані безпосередньо в кожній базовій станції eNodeB, що дозволяє самостійно здійснювати управління окремої базовою станцією на основі результатів вимірювань; ця структура дозволяє зробити систему управління більш гнучкою, але ускладнює підвищення ефективності деяких загальних процедур;
- змішану, при якій відбувається комбіноване використання двох попередніх архітектур.

Другий принцип SON-оптимізація, забезпечує досягнення максимальної ефективності функціонування обладнання eNodeB, за рахунок економії енергоспоживання, зниження інтерференції, максимальної дальності покриття та ємності сот і т.д.

Розглянемо більш докладніше функції управління, що виконуються при самооптимізації, це:

1. Координація міжсотової взаємодії ICIC. Відомо, що в мережах LTE головним видом внутрішньосистемних перешкод є вплив сусідніх сот, як результат використання в мережі однієї спільної робочої частоти, тобто міжсотова інтерференція. Переважання саме цієї перешкоди пояснюється тим, що частотно - часовий ресурс всередині стільники є ортогональним. При цьому кожному абонентському терміналу виділяються неперекриті ресурсні блоки, особливо для абонентів, що знаходяться на кордоні стільники. Ця функція також дозволяє обмежувати потужність передачі окремих блоків.

2. Координація радіопокриття мереж LTE і мереж поколінь 2G / 3G. Коли мережа LTE розгорнута «поверх» мереж другого і третього поколінь з несучільним радіопокриттям, функції SON забезпечують передачу даних в розривах цього радіопокриття за рахунок використання об'єднаного ресурсу мереж всіх поколінь. Це дозволяє також вирішувати завдання перерозподілу потоків різних видів трафіку [12].

Наприклад, розвантажити мережу LTE від мовного трафіку і передавати його по мережах 2G і 3G, а високошвидкісний трафік направляти в мережу LTE.

3. Мінімізація числа перевірочних тестів і вимірювань. При узгодженні інформації про стан мережі, одержуваної в автоматичному режимі від абонентських терміналів, рекомендується проведення тестів мережі на різних етапах її функціонування, що дозволяє скоротити витрати на її обслуговування.

Розглянемо докладно метод самоврядування мережею за допомогою ортогонального частотного мультиплексування OFDM. Для конкретизації завдання були розглянуті особливості побудови радіоінтерфейсу системи LTE.

Третій принцип SON - самовідновлення дозволяє службі експлуатації відновлювати мережу в напівавтоматичному режимі в разі збою при обов'язковому виконанні функцій початкової діагностики працездатності мережі.

Алгоритми SON вбудовуються в обладнання всіх вузлів мережі. У нових моделях смартфонів використовується спеціальне програмне забезпечення, при установці якого самі абоненти стають джерелами інформації про якість зв'язку. У мережах LTE базова станція eNodeB стає одним концентратором, що збирає і передає статистику про характеристики радіотракту.

При проектуванні і запуску мереж LTE, оператора цікавлять перспективи окупності обладнання, а також необхідний обсяг ресурсів мережі для обслуговування заявок з різними вимогами до рівня якості. Єдиними можливими інструментами для цього при впровадженні нових технологій в даний час є аналітичне та імітаційне моделювання. На засіданні робочих груп 3GPP приймаються і коригуються певні параметри і сценарії моделювання.

Існують і постійно поліпшуються виробниками програмного забезпечення комп'ютерні симулятори, які детально моделюють радіоінтерфейси мобільних мереж. Найбільш поширеною архітектурою симуляторів є дискретно-подієва. У ній основним елементом моделювання є подія, що відбувається в певний момент часу і приводить до зміни стану системи, це може бути: початок і завершення розмови, встановлення відео з'єднання, зміна швидкості передачі, зміна кодека і т.п. Можливо моделювання як радіоканалу, так і алгоритмів протоколів управління, трафіку, мобільності абонентів і профілів їх обслуговування.

Таким чином, симулятори дозволяють вирішувати такі завдання:

- прогнозування середніх і максимальних показників продуктивності мережі;
- оцінка якості обслуговування з урахуванням впровадження нових послуг на мережі;
- оцінка потенційної стійкості мережі при збільшенні навантаження і пошук «вузьких місць» коли обсяг трафіку збільшується, наприклад, при проведенні великих заходів.

Одним з переваг імітаційного моделювання є його гнучкість, в залежності від поставлених цілей і наявної статистики. В даний час розроблені симулятори LTE-Sim і ns-3, які дозволяють моделювати поряд з мережами LTE і мережі Wi-Fi, що важливо в зв'язку з розвитком гетерогенних технологій.

При моделюванні фрагмента мережі LTE використовуються наступні вхідні параметри: ширина частотного каналу, алгоритм управління радіо

ресурсами, топологія розміщення базової станції і її характеристики, параметри мобільності абонентів, параметри трафіку в мережі, характеристики абонентських терміналів, параметри множинного доступу, алгоритми управління радіо ресурсами, профілі обслуговування абонентів, технологія транспортної частини мережі [13].

Розглянемо детально процес моделювання радіоканалу передачі між призначеним для користувача обладнанням UE і базовою станцією eNodeB.

### 5.3 Аналіз результатів моделювання радіоканалу передачі між UE і eNodeB

В роботі проведено тестування і оцінка продуктивності каналів радіопередачі ресурсних блоків мережі LTE за допомогою пакета MATLAB і Simulink. В якості вихідних даних прийнято: тип каналу передачі - R.12; режим передачі в обох напрямках - TDD; число переданих кадрів - 8.

Після вибору каналу передачі RMC, всі інші параметри налаштовуються програмно відповідно до специфікації 3GPP. Для каналу передачі R.12 специфікацією 3GPP кількість ресурсних блоків задано рівним 6, кількість антен задано рівним 4 і т.д. Всі необхідні налаштування перед генерацією спадного сигналу наведені на інтерфейсі, представленому на рисунку 5.1.

Generate preset PDSCH reference measurement channel (RMC) waveforms. These are specified in TS 36.101 Annex A.3 for UE performance testing. Use the command line interface for full parameter control.

Parameter	Value
Reference channel	R.12 (TxDiver...)
Duplex mode	TDD
Transmission scheme	TxDiversity
Cell identity	0
RNTI	1
RV sequence	[0 1 2 3]
Rho (dB)	0
OCNG	Off
Number of subframes	8
Number of codewords	1
PMI set	[1]
Number of HARQ processes	7
Windowing (samples)	0
Waveform output variable	rmcwaveform
Resource grid output variable	rmcgrid
RMC configuration output variable	rmcconfig

RMC parameter summary	
Transmission scheme	TxDiversity
Number of downlink resource blocks	6
Number of allocated resource blocks	6
Cell-specific reference signal ports	4
Modulation scheme	QPSK
Transmission layers	4
Total info bits per frame per codeword	1024 bits

Note: \* indicates value can change per subframe

Codeword input data	
Transport info bit stream (codeword 1)	User defined [1; 0; 0; 1]
Transport info bit stream (codeword 2)	User defined [1; 0; 0; 1]

Buttons: Generate waveform, Help

Рисунок 5.1 – Налаштування каналу передач

Потім, MATLAB генерує точно такий же сигнал безпосередньо. Після цього випадковим чином створюються дані в тимчасовому і частотному діапазонах. Після запуску програми на виконання на екрані відображається спектр сигналу. 6 ресурсних блоків контрольно-вимірювального каналу займають смугу сигналу шириною 1 МГц.

Потім, проводиться формування частотно-часової ресурсної сітки і при виведенні функції генерації OFDM символів «lte-OFDM-Modulate» на екран, ми отримуємо сигнал, готовий для передачі в ефір

Після цього повинен бути проведений тест на пропускну здатність досліджуваного радіоканалу при початкових умовах відносини сигнал шум - 2.3, 0.9, 3.3. І для тестування пропускну здатності використовується один кадр.

Потім була визначена мінімальна пропускну здатність для висхідного каналу при заданому співвідношенні сигнал / шум. При генерації сигналу, шум каналу додається до отриманого раніше сигналу. Результатом дослідження є ресурсна сітка для кожної антени. Оцінка пропускну здатності каналу виконується для визначення пропускну здатності між кожною передачею і отриманням пари антен.

Після запуску заданого коду, отримані два графіка (рисунок 5.2 і 5.3). Пропускну здатність каналу приведена на рисунках у відсотках від загального обсягу ємності фрагмента мережі і в Мбіт / с.

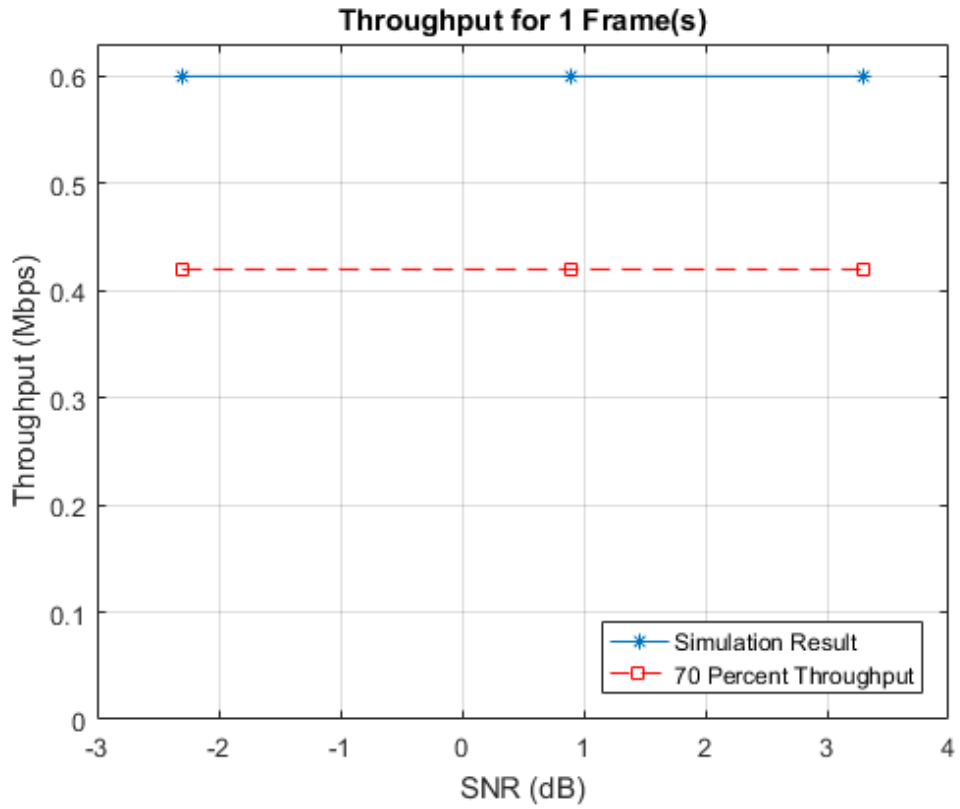


Рисунок 5.2 – Графік пропускної здатності каналу в Мбіт / с

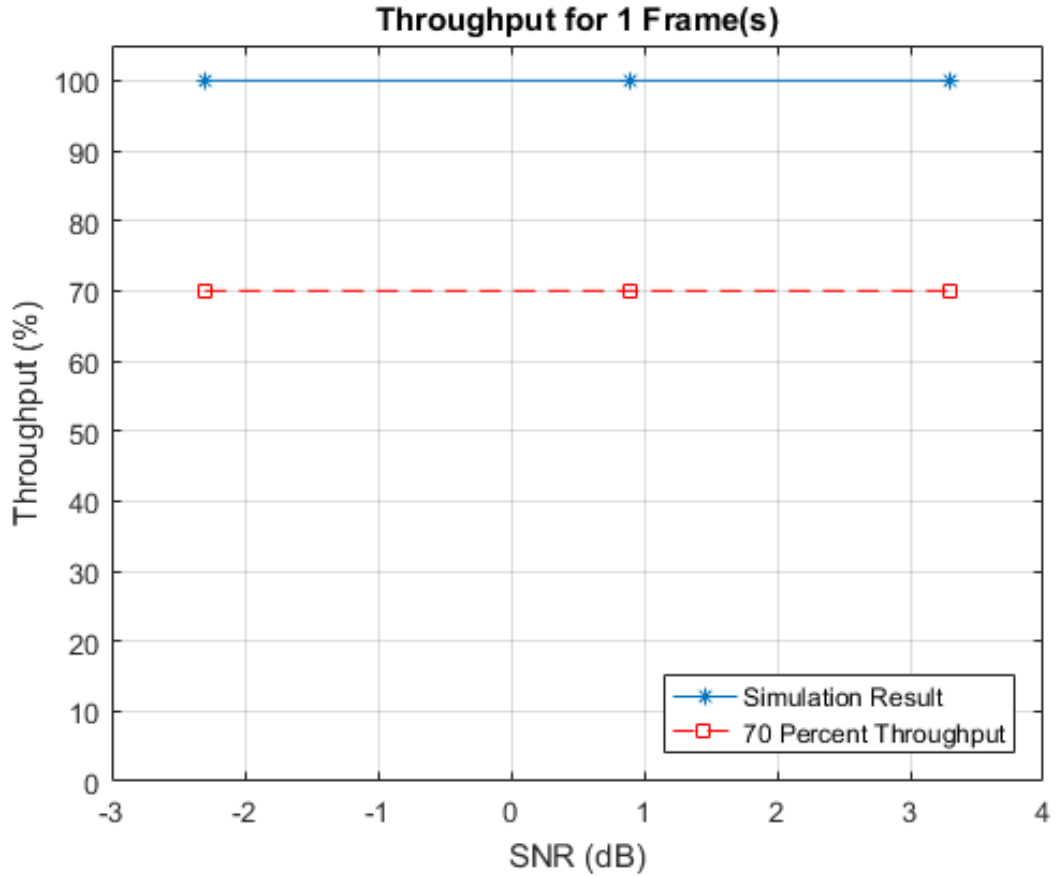


Рисунок 5.3 – Графік пропускної здатності в процентах

На рисунку 5.4 зображений спектр досліджуваного сигналу. Жовтим кольором показаний сигнал в низхідному каналі передачі сигналу, синім - у висхідному каналі.

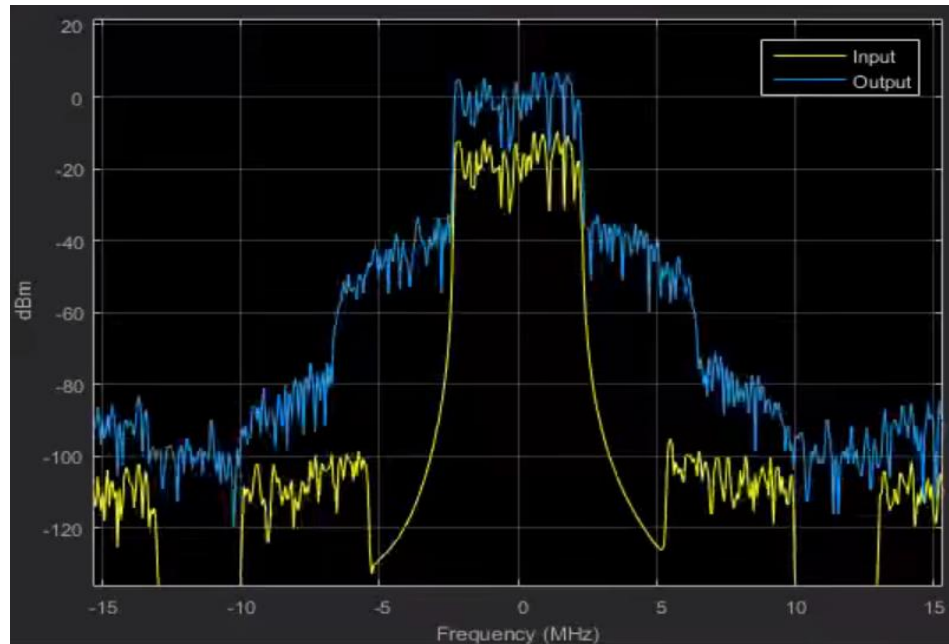


Рисунок 5.4 – Спектр досліджуваного сигналу

#### 5.4 Побудова моделі обслуговування неоднорідного трафіку на фрагменті мережі LTE

У першому розділі було показано, що трафік в мережах LTE можна умовно розділити на трафік реального часу, який чутливий до затримок і повинен мати фіксовану швидкість передачі (мова, відеоконференції з різним ступенем якості і т.д.), і еластичний трафік, що відноситься до передачі даних, швидкість якого змінюється пропорційно пропускну здатності стільники, незадіяною в процесі передачі трафіку реального часів (скачування файлів, обмін даними і т.д.).

Саме властивості еластичного трафіку дають можливість істотно підвищити ефективність використання ресурсу передачі інформації. Це особливо важливо для перспективних мереж рухомого зв'язку, до яких відносяться мережі стандарту LTE, в яких в основному використовуються для користувача пристрої з інтелектуальними модемами, що збільшують частку еластичного трафіку. Очевидно, що спільна передача різномірного трафіку потребує коштів контролю, що забезпечують задані показники якості

обслуговування заявок. Найпростішою спосіб контролю - це введення обмежувальних порогів на швидкість передачі еластичного трафіку даних.

Розглянемо процес побудови моделі.

Через  $C$  позначимо швидкість передачі інформації, що забезпечується технічними можливостями окремого фрагменту мережі стандарту LTE. Процес надходження заявок обмежимо одним потоком заявок на обслуговування трафіку реального часу і одним потоком заявок на передачу еластичного трафіку даних. Прийmemo, що заявки на передачу трафіку реального часу надходять по пуассонівського закону з інтенсивністю  $\lambda_r$ . Для обслуговування однієї заявки потрібно виділити з наявної пропускнуої спроможності стільки ресурсу в розмірі  $C_r$  біт / с. Час обслуговування заявки реального часу  $t_r$  має експоненціальне розподіл із середнім  $\frac{1}{\mu}$ , де  $\mu_r$  - параметр експоненціального розподілу [14].

Також прийmemo, що процес надходження заявок на передачу даних також підпорядковується пуассонівського закону з інтенсивністю  $\lambda_d$ . Для обслуговування однієї заявки з наявної вільної пропускнуої спроможності, виділяється максимально можливий ресурсу в розмірі  $C_d$  біт / с, що задовольняє нерівності  $C_1 \leq C_d \leq C_2$ . величини  $C_1$  і  $C_2$  задають відповідно мінімальну і максимальну швидкість завантаження файлів, прийmemo, що  $C_1 \leq C_2$ . У моделі прийнято, що обсяг переданого файлу даних має експоненціальне розподіл із середнім значенням  $F$ , Вираженням в бітах. Очевидно, що час передачі файлу з використанням тільки мінімальної  $C_1$  і тільки максимальної  $C_2$  швидкостей має експоненціальний розподіл з параметрами відповідно  $\mu_{d,1}$  і  $\mu_{d,2}$ . значення параметрів  $\mu_{d,1}$  і  $\mu_{d,2}$  визначаються з співвідношень  $\mu_{d,1} = \frac{C_1}{F}$  і  $\mu_{d,2} = \frac{C_2}{F}$ .

У моделі також прийнято, що заявки на передачу трафіку реального часу мають відносний пріоритет при використанні ресурсу передачі інформації. позначимо через  $i_r$  і  $i_d$  число заявок на передачу трафіку, відповідно, реального часу і даних, що знаходяться на обслуговуванні в момент надходження заявки на передачу трафіку реального часу. Якщо фрагмент мережі в своєму

розпорядженні достатній вільним ресурсом, тобто виконується нерівність  $i_r c_r + i_d c_2 \leq C$ , то заявка приймається на обслуговування і для цього виділяється ресурс в обсязі  $c_r$  біт / с.

Якщо виконується нерівність  $i_r c_r + i_d c_1 > C$ , то заявка, яка надійшла на передачу файлів, отримує відмову, оскільки в даній ситуації або немає вільного ресурсу в обсязі  $C_1$  біт / с, або не можна отримати зазначену величину ресурсу, зменшивши швидкість передачі  $i_d$  файлів, що знаходяться на обслуговуванні, тому що вказана дія зменшить швидкість передачі всіх файлів, включаючи тих, які надійшли, до значення меншого ніж  $C_1$ .

Для побудови моделі розподілу ресурсу проаналізуємо процес розподілу ресурсу в окремій соті мережі стандарту LTE. Позначимо через  $i_r i_d$  вектор стану числа заявок, які знаходяться на обслуговуванні у соті. Тут  $i_r$  - число заявок на передачу трафіку реального часу,  $i_d$  - число заявок на передачу файлів. Час обслуговування кожної з  $i_r$  заявок на передачу трафіку реального часу має експоненціальне розподіл з параметром  $\mu_r$ . На обслуговування трафіку реального часу в стані  $i_r i_d$  виділяється ресурс в розмірі  $i_r c_r$  біт / с.

Час обслуговування кожної з  $i_d$  заявок на передачу файлів в стані  $(i_r i_d)$  також має експоненціальне розподіл. Позначимо параметр розподілу через  $\mu_d$ . Параметр  $\mu_d$  залежить від ступеня завантаження соті. Якщо виконується співвідношення  $i_r c_r + i_d c_2 \leq C$ , то кожен з  $i_d$  файлів, які обслуговуються, передаються з максимально можливою швидкістю  $C_2$ . У цій ситуації на обслуговування трафіку даних в стані  $(i_r i_d)$  виділяється ресурс соті в розмірі  $i_r c_r + i_d c_2$  біт / с. При цьому частина ресурсу соті в розмірі  $C - i_r c_r - i_d c_2$  залишається задіяною в силу обмежень на максимально можливу швидкість передачі даних. Параметр розподілу часу обслуговування визначається зі співвідношення  $\mu_{d,2} = \frac{C_2}{C - i_r c_r - i_d c_2}$ . Якщо ж виконується зворотне співвідношення  $i_r c_r + i_d c_2 > C$ , то кожен з  $i_d$  обслуговується в стані  $(i_r i_d)$  файлів, передається зі швидкістю  $c - \frac{-i_r c_r}{i_d}$ . У цій ситуації на обслуговування трафіку даних виділяється ресурс соті в розмірі  $C - i_r c_r$  біт / с і весь ресурс стільники задіяний на обслуговування надійшов трафіку. Параметр розподілу часу передачі файлу визначається зі співвідношення  $\mu = c - \frac{-i_r c_r}{i_d}$ . Позначимо

через  $C_{r,d}$  величину ресурсу зайнятого в стані  $(i_r i_d)$  на обслуговування прийнятих заявок.

Таким чином, при зміні швидкості передачі в тій же пропорції змінюється середнє значення залишкового часу обслуговування заявки на передачу файлу. Швидкості передачі даних змінюється динамічно. При малому завантаженні фрагменту мережі LTE дані передаються з максимально можливою швидкістю  $C_2$ , яка підтримується технічними можливостями системи LTE, при великому завантаженні мережі - зі швидкістю  $C_1$ . Відзначимо, що при цьому використовується ресурс, а, отже, і швидкість передачі трафіку сервісів реального часу не змінюються.

Як приклад розподілу ресурсу передачі інформації розглянуто процес надходження і обслуговування заявок в ситуації, коли загальна швидкість дорівнює  $C = 10$  Мбіт / с, швидкість обслуговування трафіку реального часу становить  $C_r = 1$  Мбіт / с, швидкості передачі файлів даних  $C_1 = 1$  Мбіт / с,  $C_2 = 2$  Мбіт / с і сота знаходиться в стані (2,2). Таким чином, в даний момент часу  $t_0$  зайнято  $C_{r,d} = 2 + 2 * 2 = 6$  Мбіт / с. Припустимо, в момент  $t_1$  надходить ще одна заявка на передачу трафіку реального часу. Вона приймається до обслуговування і система переходить в стан (3,2). У цьому стані  $C_{r,d} = 2 + 2 * 2 = 7$  Мбіт / с. Потім, в момент часу  $t_2$  надходить заявка на передачу ще одного файлу. Вона приймається до обслуговування з максимальною швидкістю  $C_2 = 2$  Мбіт / с і система переходить в стан (3,3). У цьому стані загальна швидкість складе  $C_{r,d} = 3 + 3 * 2 = 9$  Мбіт / с. Якщо тепер в момент  $t_3$  надходить ще одна заявка на передачу файлу, вона буде прийнята до обслуговування. Система перейде в стан (3,4). При цьому швидкість передачі всіх прийнятих раніше файлів, включаючи інформацію, що надійшла заявкою, визначиться як:  $\frac{10-3}{4} = 1,75$  Мбіт / с.

Якщо тепер в момент  $t_4$  надійде заявка на передачу трафіку реального часу, вона буде прийнята до обслуговування. Система переходить в стан (4,4). При цьому швидкість передачі всіх файлів, що передаються даними,

зменшиться до величини  $\frac{10^{-4}}{4} = 1,5$  Мбіт / с. Заявка, яка надходила в наступний момент  $t_5$  на передачу трафіку реального часу, також візьметься до обслуговування і система перейде в стан (5,4). При цьому швидкість передачі всіх файлів, що передаються, зменшиться до  $\frac{10^{-5}}{4} = 1,25$  Мбіт / с. Заявка, яка поступила в момент  $t_6$  на передачу файлу, також приймається на обслуговування. Система переходить в стан (5,5). При цьому швидкість передачі всіх файлів даних, визначиться як:  $\frac{10^{-5}}{5} = 1$  Мбіт / с. Тобто дані почнуть передаватися з мінімально можливою швидкістю  $C_1 = 1$  Мбіт / с. Якщо в системі не відбудеться закінчення обслуговування будь-якої заявки, то наступна заявка будь-якого типу отримає відмову в обслуговуванні.

Таким чином система продовжить давати відмови новим заявками, поки не закінчиться передача хоча б однієї заявки будь-якого типу.

### 5.5 Система рівнянь статистичної рівноваги

Щоб отримати значення введених показників, необхідно побудувати і вирішити систему рівнянь статистичної рівноваги, яка б пов'язала значення стаціонарних ймовірностей  $p(i_r, i_d)$ . Використовуючи фундаментальні результати теорії марковських процесів, під час запису системи рівнянь рівноваги необхідно знайти і скласти інтенсивності всіх подій, аналізованих у даній моделі, реалізація яких призводить до виходу процесу  $\tau(t)$  з довільного стану  $(i_r, i_d) \in S$  (Ліва частина системи рівнянь рівноваги), і прирівняти їх до сумарної інтенсивності переходу  $\tau(t)$  в стан  $(i_r, i_d)$  (Права частина системи рівнянь рівноваги).

Можливість реалізації кожного з розглянутих подій залежить від співвідношення між числом заявок на передачу трафіку реального часу і передачу файлів, що знаходяться в системі на обслуговуванні. Розглянемо покрокове застосування сформульованого положення.

Стан  $(i_r, i_d)$  змінюється в результаті настання наступних подій:

1. При збільшенні числа заявок на передачу трафіку реального часу, що знаходяться на обслуговуванні. Розглянуті події настають з інтенсивністю  $\lambda_r$  за умови, що ресурс соти, зайнятий в цьому стані на обслуговування трафіку реального часу і даних, менше або дорівнює величині  $C - c_r$ .

2. При збільшенні числа заявок на передачу файлів, що знаходяться на обслуговуванні. Розглянуті події надходять в систему з інтенсивністю  $\lambda_d$  за умови, що ресурс соти, зайнятий в цьому стані на обслуговування трафіку реального часу і даних, менш або дорівнює величині  $C - c_1$ .

3. При закінченні обслуговування однієї з  $i_r$  заявок на передачу трафіку реального часу. Розглянуті події надходять в систему з інтенсивністю  $i_r \mu_r$  за умови, що заявки даного типу знаходяться на обслуговуванні.

4. При закінченні обслуговування однієї з  $i_d$  заявок на передачу файлів.

Розглянуті події настають з інтенсивністю  $\min \left\{ \frac{i_d c_2}{F}, \frac{C - i_r c_r}{F} \right\}$  за умови, що

заявки даного типу знаходяться на обслуговуванні.

У правій частині даної системи рівнянь рівноваги наведемо складові, які вказують, з яких станів, з якою інтенсивністю і за яких умов можливий перехід процесу  $\tau(t)$  в стан  $(i_r, i_d)$ . Перерахуємо ці складові і умови їх появи. Отже, перехід процесу  $\tau(t)$  в стан  $(i_r, i_d)$  можливий в наступних випадках:

1. Зі стану  $(i_r - 1, i_d)$  з інтенсивністю  $\lambda_r$  в результаті надходження на обслуговування заявки на передачу трафіку реального часу. Умовою можливості реалізації цієї події служить справедливості наступного нерівності  $i_r > 0$ .

2. Зі стану  $(i_r, i_d - 1)$  з інтенсивністю  $\lambda_d$  в результаті надходження на обслуговування заявки на передачу файлу. Умовою можливості реалізації цієї події служить справедливості нерівності  $i_d > 0$ .

3. Зі стану  $(i_r + 1, i_d)$  з інтенсивністю  $(i_r + 1)\mu_r$  внаслідок завершення обслуговування заявки на передачу трафіку реального часу. Для реалізації цієї події потрібно, щоб компоненти стану  $(i_r + 1, i_d)$  задовольняли співвідношенню  $i_r c_r + i_d c_1 + c_r \leq C$ .

4. Зі стану  $(i_r, i_d + 1)$  з інтенсивністю  $\min \left\{ \frac{(i_d + 1)c_2}{F}, \frac{C - i_r c_r}{F} \right\}$  в результаті завершення обслуговування заявки на передачу файлу. Для реалізації цієї події потрібно, щоб компоненти стану  $(i_r, i_d + 1)$  задовольняли співвідношенню  $i_r c_r + i_d c_1 + c_1 \leq C$ .

Граф переходів в допустимі сусідні стани представлений на рисунку 5.5.

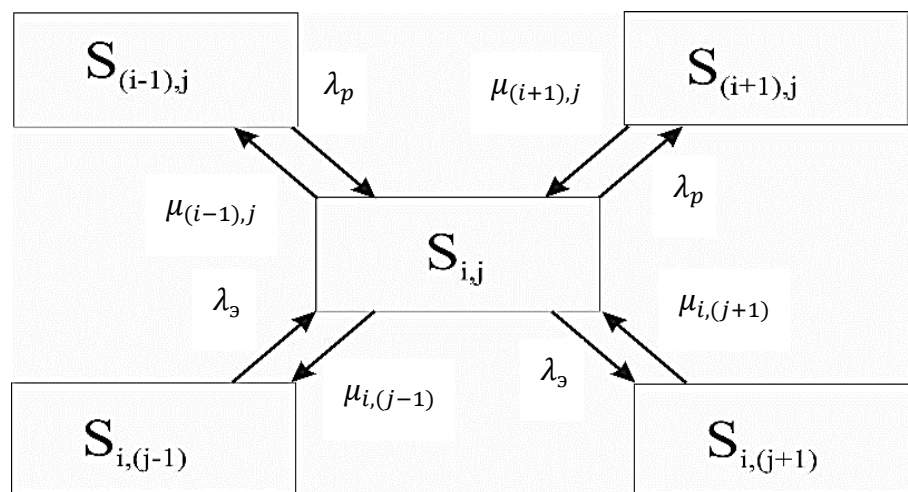


Рисунок 5.5 – Граф переходів в допустимі сусідні стани

Далі відповідно до загального правила слід порівняти інтенсивність виходу з довільного стану  $(i_r, i_d) \in S$  до інтенсивності переходу  $\tau(t)$  в стан  $(i_r, i_d)$ . В результаті отримуємо рівняння з системи рівнянь статистичної рівноваги для стану  $(i_r, i_d) \in S$ . Для запису умов настання подій, що змінюють стан моделі, скористаємося індикаторною функцією  $I(\cdot)$ , заданої виразом:

$$I(\cdot) = \begin{cases} 1 - & \text{якщо умова виконується} \\ 0 - & \text{якщо умова не виконується} \end{cases}$$

Виконавши необхідні перетворення, отримаємо таку кінцеву систему лінійних рівнянь:

$$\begin{aligned} & p(i_r, i_d) [\lambda_r I(i_r c_r + i_d c_1 + c_r \leq C) + \lambda_d I(i_r c_r + i_d c_1 + c_1 \leq C) + \\ & + \lambda_r \mu_r I(i_r > 0)] + \min \left\{ \frac{(i_d + 1)c_2}{F}, \frac{C - i_r c_r}{F} \right\} I(i_d > 0) = \\ & = p(i_r - 1, i_d) \lambda_r I(i_r > 0) + p(i_r, i_d - 1) \lambda_d I\{i_d > 0\} + \\ & + p(i_r + 1, i_d) (i_r + 1) \mu_r I(i_r c_r + i_d c_1 + c_r \leq C) + \\ & + p(i_r, i_d + 1) \min \left\{ \frac{(i_d + 1)c_2}{F}, \frac{C - i_r c_r}{F} \right\} I(i_r c_r + i_d c_1 + c_1 \leq C). \end{aligned} \quad (5.1)$$

При наступній умові нормування:  $\sum_{(i_r, i_d) \in S} p(i_r, i_d) = 1$ .

Для того щоб скористатися введеними визначеннями показників якості обслуговування заявок на спільну передачу трафіку реального часу і трафіку даних необхідно вирішити систему рівнянь рівноваги.

Система рівнянь (5.1) вирішується звичайними методами лінійної алгебри. Відповідних алгоритмів розвинене дуже багато. Вибір конкретної обчислювальної процедури залежить від властивостей матриці.

Стандартні процедури лінійної алгебри є в більшості прикладних програм типу MATLAB (Matrix Laboratory) і ін. У ряді окремих випадків можна збільшити ефективність стандартних алгоритмів, якщо скористатися блоковою структурою матриці системи рівнянь рівноваги. У цій ситуації рішення всієї системи можна розбити на рішення окремих підсистем, що мають суттєво меншу розмірність, ніж вихідна система. Розміщення ненульових елементів в матриці визначає її структуру. Зазвичай використовують лексикографічну нумерацію невідомих, при якій розраховуються ймовірності станів, які нумеруються в порядку зростання компонент стану, що позначають число заявок, що знаходяться на

обслуговуванні. Якщо компонентів стану кілька, то змінюється останній з них при фіксованих значеннях попередніх індексів [15].

Розглянемо реалізацію сформульованої процедури для системи рівнянь. Щоб виявити структуру матриці достатньо розглянути будь-який приватний випадок.

Візьмемо найбільш часто зустрічаються в практиці значення вхідних параметрів моделі (в подальшому не будемо вказувати розмірність використовуваних параметрів):  $C = 11$ ,  $c_r = 3$ ,  $c_1 = 4$ ,  $c_2 = 5$ ,  $F = 1$ . В простір станів  $S$  входять такі стани:

$$(i_r, i_d) : i_r = 0, 1, 2, 3; i_d = 0, \dots, \frac{11 - 3i_r}{4}.$$

Це стану:  $(0, 0)$ ,  $(0, 1)$ ,  $(0, 2)$ ,  $(1, 0)$ ,  $(1, 1)$ ,  $(1, 2)$ ,  $(2, 0)$ ,  $(2, 1)$ ,  $(3, 0)$ .

Випишемо всі рівняння системи. Вони мають такий вигляд:

$$P(0,0)(\lambda_r + \lambda_d) = P(1,0)\mu_r + P(0,1) \cdot 5;$$

$$P(0,1)(\lambda_r + \lambda_d + 5) = P(0,0)\lambda_d + P(1,1)\mu_r + P(0,2) \cdot 10;$$

$$P(0,2)(\lambda_r + 10) = P(0,1)\lambda_d + P(1,2)\mu_r;$$

$$P(1,0)(\lambda_r + \lambda_d + \mu_r) = P(0,0)\lambda_r + P(2,0)2\mu_r + P(1,1) \cdot 5;$$

$$P(1,1)(\lambda_r + \lambda_d + \mu_r + 5) = P(0,1)\lambda_r + P(1,0)\lambda_d + P(2,1)2\mu_r + P(1,1) \cdot 8;$$

$$P(1,2)(\mu_r + 8) = P(0,2)\lambda_r + P(1,1)\lambda_d;$$

$$P(2,0)(\lambda_r + \lambda_d + 2\mu_r) = P(1,0)\lambda_r + P(3,0)3\mu_r + P(2,1) \cdot 5;$$

$$P(2,1)(2\mu_r + 5) = P(1,1)\lambda_r + P(2,0)\lambda_d;$$

$$P(2,1)3\mu_r = P(2,0)\lambda_r.$$

При цьому умова нормування для всіх значень ймовірностей:

$$\sum_{(i_r, i_d) \in S} P(i_r, i_d) = 1.$$

Наведемо в таблиці 5.1 розташування відмінних від нуля елементів матриці системи рівнянь рівноваги для окремого випадку досліджуваної моделі. Ці елементи відзначені в таблиці зірочкою.

Таблиця 5.1 – Розташування відмінних від нуля елементів матриці системи рівнянь рівноваги для окремого випадку досліджуваної моделі при  $C = 11, c_r = 3, c_1 = 4, c_2 = 5, F = 1$ .

$(i_r, i_d)$	0,0	0,1	0,2	1,0	1,1	1,2	2,0	2,1	3,0
0,0	*	*		*					
0,1	*	*	*		*				
0,2		*	*			*			
1,0	*			*	*		*		
1,1		*		*	*	*		*	
1,2			*		*	*			
2,0				*			*	*	
2,1					*		*	*	
3,0						*			*

Зміст таблиці 5.1 вказує на наявність блокової структури у матриці системи рівнянь (5.1). Матриця має блоковий трьох–діагональний вид. При цьому розмірність блоків зменшується зі збільшенням завантаження системи. Відзначимо, що в блоковому поданні усі блоки в кожному стовпці (рядку) мають однакове число стовпців (рядків). Дії над блоковими матрицями виконуються за тими самими правилами, що застосовуються для матриць з чисельними значеннями елементів.

Відомо, що застосування блокових алгоритмів збільшує область використання прямих методів вирішення систем рівнянь рівноваги, але мають певні обмеження. На жаль, із зростанням числа кроків алгоритму і збільшенням розмірності матриць втрачається точність обчислень через появу в проміжних матрицях позитивних і негативних елементів великого порядку.

З огляду на ці обмеження, якими володіють блокові трьох–діагональні методи вирішення системи рівнянь рівноваги, а також відсутність будь-яких спеціальних властивостей у матриці аналізованої системи, розглянемо можливість використання ітераційних методів розв'язання систем рівнянь рівноваги. Найбільш відомим і простим в реалізації є ітераційний метод Гаусса-Зейделя. Він досить просто формується і дає можливість вирішувати системи рівнянь рівноваги практично будь-якої структури з числом невідомих

до декількох мільйонів. Наведемо реалізацію ітераційного алгоритму. Позначимо через  $P^{(s)}(i_r, i_d)$   $s$ -е наближення до шуканого ненормованого значенням стаціонарної ймовірності  $P(i_r, i_d)$ , отримане з використанням ітераційного методу Гаусса-Зейделя. стан  $(i_r, i_d) \in S$ . Застосування ітераційного методу Гаусса-Зейделя включає в себе наступні основні етапи:

1. Вибір початкового наближення до вектору шуканих ймовірностей. При цьому початкова нульове наближення до вектору невідомих ймовірностей зазвичай вибирається зі співвідношення  $P^0(i_r, i_d) = 1$  для всіх  $(i_r, i_d) \in S$ .

2. Використання рекурсивного співвідношення для обчислення компоненту  $(s + 1)$ -го наближення по відомим компонентів  $(s + 1)$ -го і  $s$ -го наближень. Відповідно до формальним визначенням ітераційного методу Гаусса-Зейделя компоненти  $(s + 1)$ -го наближення обчислюються за такими формулами:

$$\begin{aligned}
 P^{(s+1)}(i_r, i_d) &= \frac{1}{L_p} (P^{(s,s+1)}(i_r - 1, i_d) \lambda_r I(i_r > 0) + P^{(s,s+1)}(i_r, i_d - 1) \lambda_d I(i_d > 0) + \\
 &+ P^{(s,s+1)}(i_r + 1, i_d) (i_r + 1) \mu_r I(i_r c_r + i_d c_1 + c_r \leq C) + \\
 &+ P^{(s,s+1)}(i_r, i_d + 1) \min \left\{ \frac{(i_d + 1) c_2}{F}, \frac{C - i_r c_r}{F} \right\} I(i_r c_r + i_d c_1 + c_1 \leq C). \\
 L_p &= \lambda_r I(i_r c_r + i_d c_1 + c_r \leq C) + \lambda_d I(i_r c_r + i_d c_1 + c_1 \leq C) + \\
 &+ \lambda_r \mu_r I(i_r > 0) + \min \left\{ \frac{(i_d + 1) c_2}{F}, \frac{C - i_r c_r}{F} \right\} I(i_d > 0).
 \end{aligned}$$

Символ  $(s, s + 1)$  в використаних позначеннях означає обчислення окремих складових  $(s + 1)$ -го наближення із застосуванням вже розрахованих складових  $(s + 1)$ -го наближення. Якщо з'ясується, що вони ще не знайдені, то застосовуються відомі складові  $s$ -го наближення.

3. Завершення ітераційного циклу рішення системи рівнянь рівноваги. Збіжність ітераційного алгоритму оцінюється з аналізу ступеня малості

нормованої різниці між двома послідовними наближеннями до вектору невідомих ймовірностей, наприклад, у формі співвідношення

$$\sum_{(i_r, i_d) \in S} \frac{|P^{(s+1)}(i_r, i_d) - P^{(s)}(i_r, i_d)|}{P^{(s+1)}(i_r, i_d)} \leq \varepsilon.$$

Зазвичай, величина параметра береться з інтервалу  $10^{-6} \dots 10^{-10}$ . Реалізація ітераційного методу Гаусса-Зейделя при вирішенні системи рівнянь статистичної рівноваги може призводити до процедури. У більшості випадків є збіжність ітераційного алгоритму. Для більшої впевненості збіжність перевіряють додатковими засобами, зокрема, перевіряють виконання законів збереження, що зв'язують інтенсивності вступників та обслужених потоків заявок, в аналізованій системі зв'язку.

4. Оцінка ймовірностей станів окремих станів моделі. На завершальному етапі обчислюються значення нормованих ймовірностей станів аналізованої моделі. Для оцінки ймовірностей використовуються співвідношення:

$$p(i_r, i_d) = \frac{P^{(s+1)}(i_r, i_d)}{\sum_{(i_r, i_d) \in S} P^{(s+1)}(i_r, i_d)}.$$

Використовуючи ітераційний метод Гаусса-Зейделя, можна вирішувати системи рівнянь рівноваги, що складаються з декількох мільйонів невідомих.

Наведемо реалізацію сформульованої ітераційної схеми на прикладі рішення системи рівнянь (5.1). Після нескладних перетворень отримуємо наступну рекурсію:

$$P^{(s+1)}(0,0) = \frac{1}{(\lambda_r + \lambda_d)} (P^{(s)}(1,0)\mu_r + P^{(s)}(0,1) \cdot 5);$$

$$P^{(s+1)}(0,1) = \frac{1}{(\lambda_r + \lambda_d + 5)} (P^{(s+1)}(0,0)\lambda_d + P^{(s)}(1,1)\mu_r + P^{(s)}(0,2) \cdot 10);$$

$$P^{(s+1)}(0,2) = \frac{1}{(\lambda_r + 10)} (P^{(s+1)}(0,1)\lambda_d + P^{(s)}(1,2)\mu_r);$$

$$P^{(s+1)}(1,0) = \frac{1}{(\lambda_r + \lambda_d + \mu_r)} (P^{(s+1)}(0,0)\lambda_r + P^{(s)}(2,0)2\mu_r + P^{(s)}(1,1) \cdot 5);$$

$$P^{(s+1)}(1,1) = \frac{1}{(\lambda_r + \lambda_d + \mu_r + 5)} (P^{(s+1)}(0,1)\lambda_r + P^{(s+1)}(1,0)\lambda_d + P^{(s)}(2,1)2\mu_r + P^{(s)}(1,1) \cdot 8);$$

$$P^{(s+1)}(1,2) = \frac{1}{(\mu_r + 8)} (P^{(s+1)}(0,2)\lambda_r + P^{(s+1)}(1,1)\lambda_d);$$

$$P^{(s+1)}(2,0) = \frac{1}{(\lambda_r + \lambda_d + 2\mu_r)} (P^{(s+1)}(1,0)\lambda_r + P^{(s)}(3,0)3\mu_r + P^{(s)}(2,1) \cdot 5);$$

$$P^{(s+1)}(2,1) = \frac{1}{(2\mu_r + 5)} (P^{(s)}(1,1)\lambda_r + P^{(s)}(2,0)\lambda_d);$$

## ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Стандарт високошвидкісної передачі даних, розроблений Консорціумом 3GPP, активно розширюється і розгортається в світі. Найважливішою перешкодою на шляху просування LTE є забезпечення традиційних послуг телефонії та SMS, на які як і раніше припадає основна частина доходів мобільних операторів.

Для вирішення проблеми було проведено детальний огляд конкурентоспроможних технологій, що дозволяють реалізувати послугу з передачі голосу в мережі LTE. Зроблено аналіз і докладно викладено принципи роботи представлених технологій, виявлені переваги і недоліки кожної з них. Методом порівняння обраний найбільш відповідний спосіб вирішення проблеми організації голосових послуг.

Проведено експериментальне дослідження обраного стандарту передачі голосу CS Fallback. Ретельно вивчені недоліки, а саме підрахунок часу і затримок, обумовлені цією технологією. Проведено дослідження впливу параметрів мережі і характеру підключень на затримки.

Результати дослідження показали, що затримки існують і можуть вплинути на якість обслуговування. Запропоновано варіант з впровадженням технології CSFB з подальшим оновленням до ULTRA-Flash CSFB.

Володіючи розгорнутою мережею третього покоління, технологія CS Fallback забезпечить плавний перехід до мереж LTE з послугою передачі голосу. А оновлення дозволить знизити величину затримок і поліпшити інші характеристики мережі.

Варто відзначити, що для довгострокової перспективи єдиним рішенням є варіант впровадження системи IMS. Кінцевою метою буде повноцінна платформа IMS і перехід всього голосового зв'язку (дзвінків) в пакетні мережі.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Анисимов А. В. [Электронный ресурс] - Электрон. текстовые дан. - Режим доступа: <http://anisimoff.org/lte/lte.html/>. - Загл. с экрана.
2. Гельгор, А.Л. Технология LTE мобильной передачи данных [Текст]: учеб. пособие / А.Л. Гельгор, Е.А. Попов. -- СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.--204 с.
3. Гринфилд Д. Терабитные маршрутизаторы: поучительная путаница // Журнал сетевых решений – LAN. 2000. №4. С.21-23. 11. Раскин Л.Г., Кириченко И.О. Многоиндексные задачи линейного программирования. М.: Радио и связь, 1982. 240 с.
4. Евсеева О.Ю. Методика экспериментального исследования методов управления трафиком в сети [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникацій. – 2011. – № 3 (5). – С. 89 – 104. – Режим доступа до журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113\\_yevseyeva\\_experiment.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_yevseyeva_experiment.pdf).
5. История развития сотовой связи [Электронный ресурс] - Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <http://www.corporacia.ru/pages/page/show/237.htm>. - Загл. с экрана.
6. Коган, С.С. Пакетные оптические транспортные сети: инновационные решения компании Alkatel – Lucent [Текст] / С.С. Коган // Электросвязь. – 2014. – № 12. – с. 70-74.
7. Комаров О.В. Інтеграція нових технологій для удосконалення LTE мереж / наук. кер. Ю.Ю. Коляденко // 22-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь в ХХІ столітті». Зб. Матеріалів форуму. Т.4. – Харків: ХНУРЕ, 2018. – с. 50-51.
8. Комаров О.В. Дослідження способів реалізації передачі голосу в мережі LTE / наук. кер. Ю.Ю. Коляденко // VI Міжнародна науково-практична конференція, Харків, 10-12 травня 2020. Зб. Матеріалів форуму. – Харків, 2020. – с. 291-294.
9. Подлесный, С. А. Устройства приема и обработки сигналов [Электронный ресурс] : Учеб. пособие / С. А. Подлесный, Ф. В. Зандер. - Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. - 352 с. - ISBN 978-5-7638- 2263-2. ЭБС «Знаниум».

10. Поляков, В. Т. Техника радиоприема: простые приемники АМ сигналов [Электронный ресурс] / В. Т. Поляков. - М.: ДМК Пресс, 2008. - 256 с.: ил. - (В помощь радиолюбителю). - ISBN 5-94074- 056-1. ЭБС «Знаниум».
11. Тихвинський, В.О. Мережі мобільного зв'язку LTE: технологія і архітектура [Текст]: підр. / В. О. Тихвинський, С.В. Терентьев, А. Б. Юрчук; - М.: 2010. – 378 с. – Еко-Трендз: с.163-170.
12. Тихвинский, В.О. Сети мобильной связи LTE: технология и архитектура [Текст] / В. О. Тихвинский, С.В. Терентьев, А. Б. Юрчук. - М.: Эко-Трендз, 2010. - 284 с.
13. Чеботарева, Д.В. Багатокритерійна оптимізація проектних рішень при планування стільникових мереж мобільного зв'язку [Текст]: підр. / Д.В. Чеботарева, В.М.Безрук; - Х.: 2013. – 317 с. – Телеком: с.267-284.
14. LTE: взгляд изнутри [Электронный ресурс] - Электрон. текстовые дан. - Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/136317/>. - Загл. с экрана.
15. LAN Журнал Сетевых Решений [Электронный ресурс] - Электрон. текстовые дан. - Режим доступа: <http://www.osp.ru/telecom/2011/12/13012037/>. - Загл. с экрана.
16. LTE Advanced [Электронный ресурс] - Электрон. текстовые дан. - Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/LTE\\_Advanced/](https://ru.wikipedia.org/wiki/LTE_Advanced/). - Загл. с экрана.
17. Терещенко І.В. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» у випускних роботах студентів ОКР «бакалавр» кафедри ТКС факультету ТКВТ очної та заочної форм навчання/І.В. Терещенко, С.В. Штангей, – Харків: ХНУРЕ, 2012. – 50 с. – Укр.
18. Avallone S. D-ITG Distributed Internet Traffic Generator / S. Avallone, S. Guadagno, D. Emma, A. Pescape, G. Ventre // Proceedings of the First International Conference on the Quantitative Evaluation of Systems (QEST'04) – 2004. – Vol. 4. – P 58-59.
19. Ashraf I., Claussen H., Ho L. T. W. Distributed radio coverage optimization in enterprise femtocell networks // Communications, IEEE International Conference on. 2010. P. 1–6
20. Avallone S. Performance evaluation of an open distributed platform for realistic traffic generation / S. Avallone, S. Guadagno, D. Emma, A. Pescape, G. Ventre // Performance evaluation. International journal – 2005. – P 359-392.
21. Kolahi S. S. Performance Monitoring of Various Network Traffic Generators / S. S.Kolahi, S.Narayan, Du. D. T. Nguyen, Y. Sunarto // UKSIM '11

Proceedings of the 2011 UKSim 13th International Conference on Computer Modelling and Simulation – 2011. – P 501-506.

22. Komarov O. Aanalysis of methods to implementing voice transmission in the lte network / Kolyadenko Yu. // The 2 nd International scientific and practical conference —Modern science: problems and innovations|| (May 3-5, 2020) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. Stockholm: Sweden, 2020. – p. 246-250.

23. Minei I. MPLS DiffServ-aware Traffic Engineering. Juniper Networks, Inc., 2004. 24 p.

24. Ho M. J., Stuber G. L., Austin M. D. Performance of switched-beam smart antennas for cellular radio systems //Vehicular Technology, IEEE Transactions on. 1998. V. 47, №. 1. P. 10–19.